

Ocean a klimat:

wczoraj, dziś i jutro

Wykład 10:

Zmiany klimatyczne w rejonach polarnych

Jacek Piskozub

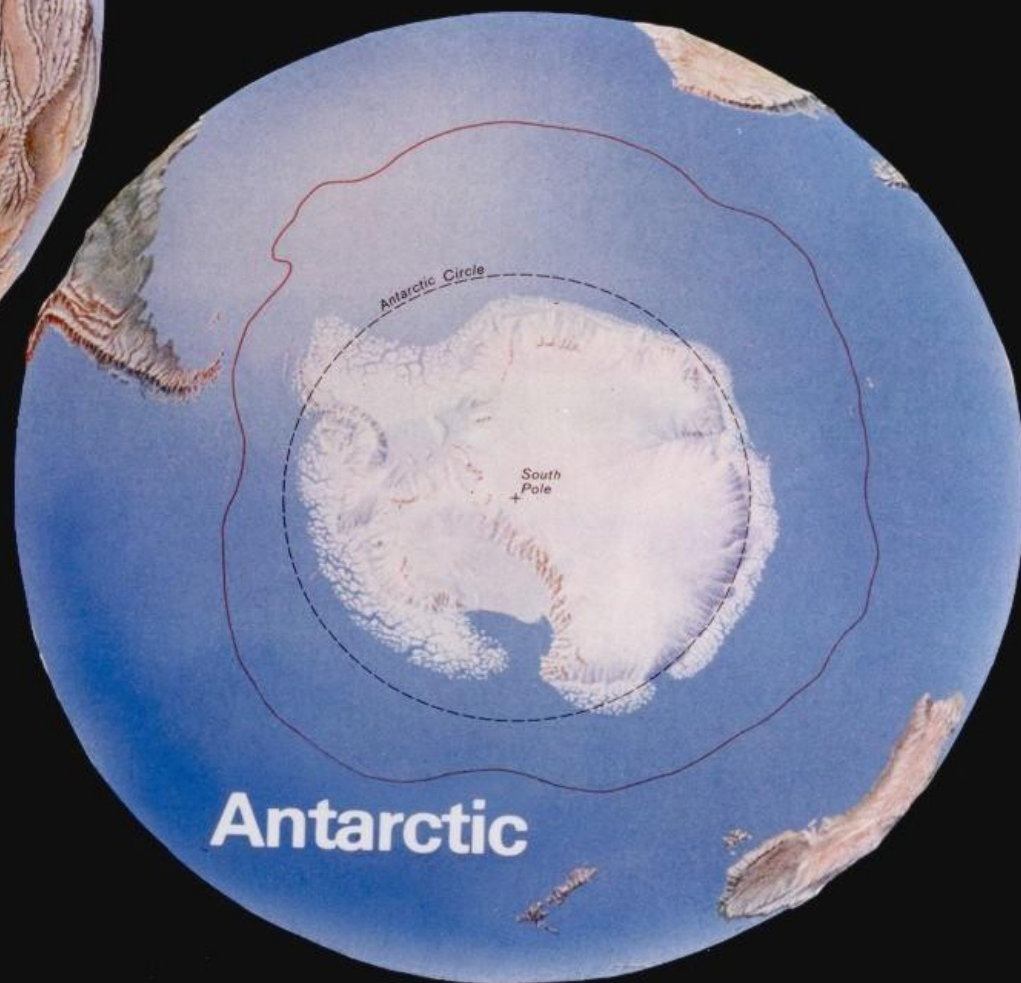
Studium Doktoranckie IOPAN, semestr zimowy 2015/16 r.

<http://www.iopan.gda.pl/~piskozub/klimat/>

Jacek Piskozub “Klimat a ocean: wczoraj, dziś i jutro”, kurs wykładów dla doktorantów X 2015 – I 2016

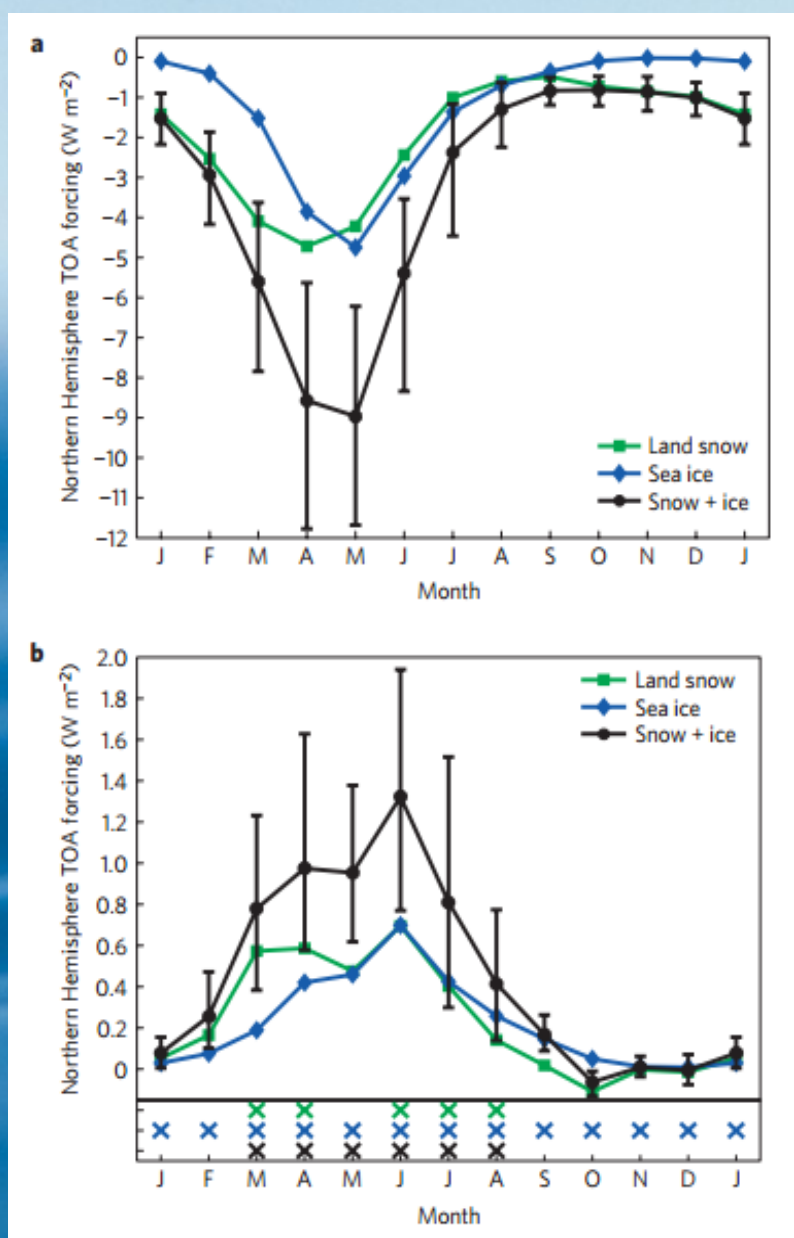
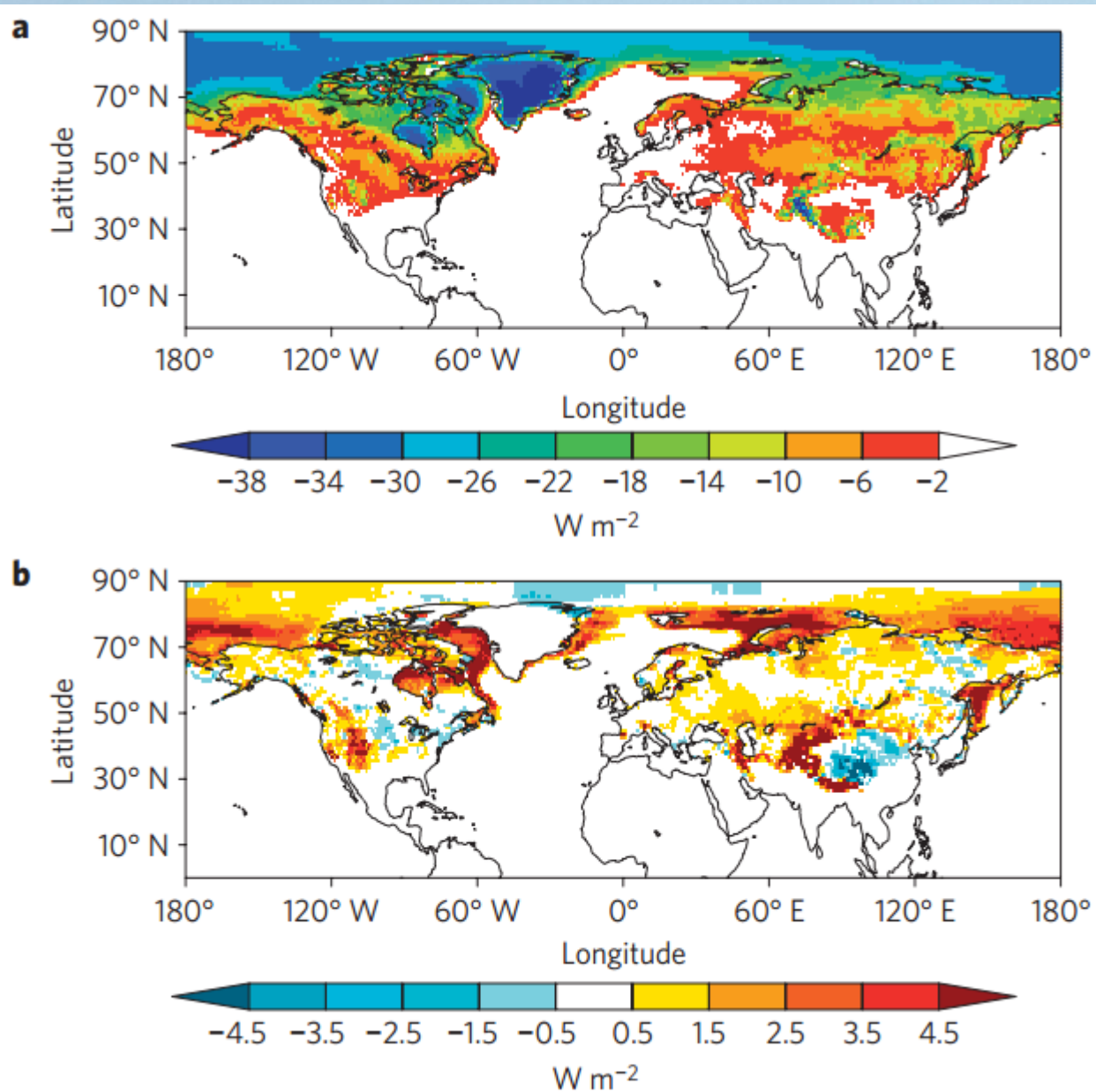
- ✓ Maszyna klimatyczna Ziemia (*zmienność w skali geologicznej*)
- ✓ Epoka lodowa w której żyjemy (*zmienność w skali astronomicznej*)
- ✓ Gwałtowne zmiany klimatu (*deglacacja, zmienność “suborbitalna”*)
- ✓ Holocen: klimat, ocean a cywilizacja, (*stała słoneczna i wulkanizm*)
- ✓ Północny Atlantyk – kuźnia klimatu (*cyrkulacja termohalinowa*)
- ✓ Zmienność klimatu w skali dekadальной (*AMO, NAO, PDO*)
- ✓ Tropiki a zmienność klimatu (*ENSO, huragany, monsuny*)
- ✓ Aerosol: wielka niewiadoma klimatyczna
- ✓ Gazy o znaczeniu klimatycznym (*cykl węgla, CO₂, metan, DMS*)
- ✓ Globalne ocieplenie a ocean (*zmienność antropogeniczna*)
- ✓ **Zmiany klimatyczne w rejonach polarnych**

Obszary polarne podlegają szczególnie silnym zmianom klimatycznym dzięki efektowi wzmocnienia wymuszeń związanemu ze zmianami pokrycia śniegiem i lodem.



Zwally 2006 (AMS polar ice meeting) after... CIA

Wymuszenia związane z kriosferą i ich zmiany



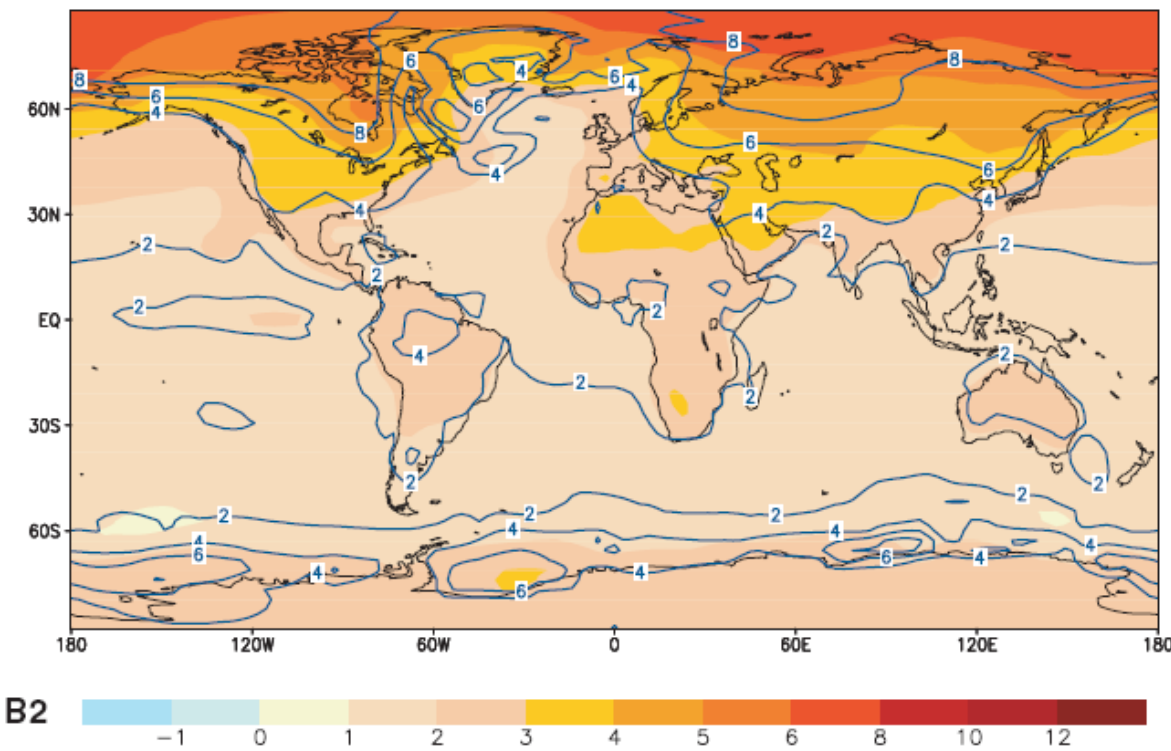
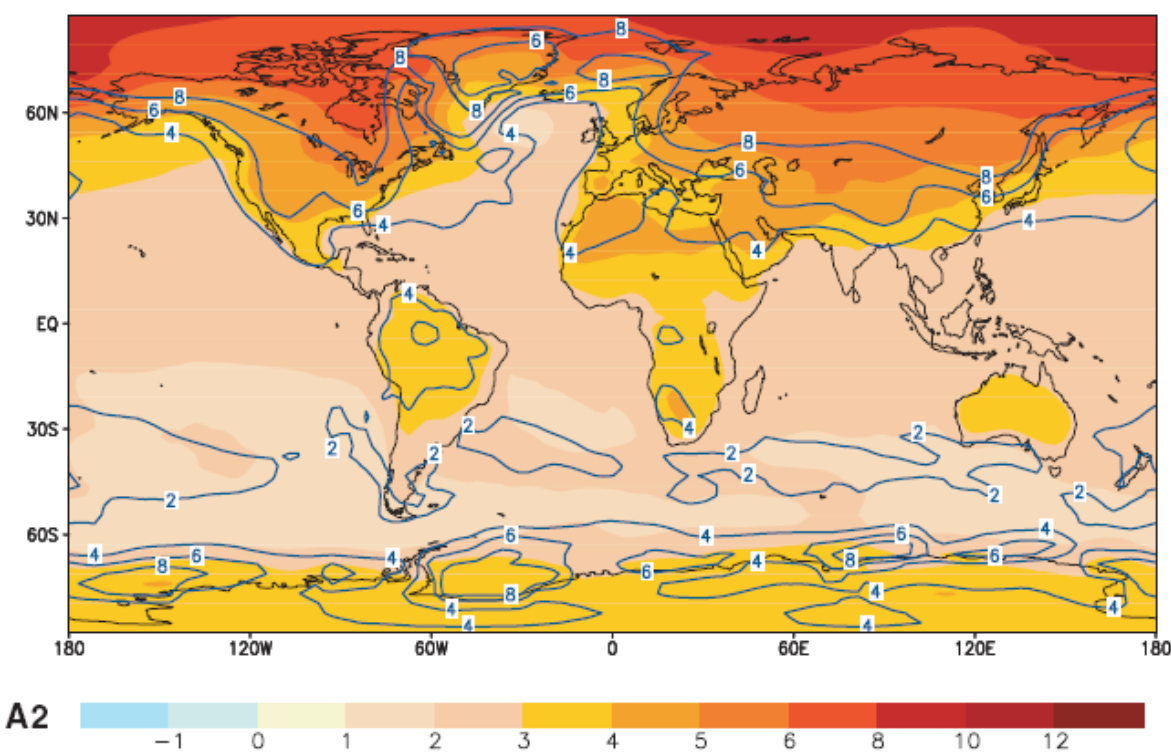
Średnie wymuszenia związane z kriosferą w latach 1979-2008 (a) i ich trzydziestoletnie trendy (b).

Flanner et al 2011 (Nature Geoscience)

Przypomnienie: Świat końca XXI wieku

Przykładowe wyniki modelowania (średnia dla zestawu modeli). Rysunki przedstawiają średnią zmianę temperatury dla lat 2071-2100 w porównaniu do lat 1910-1990 dla scenariusza A2 i B2.

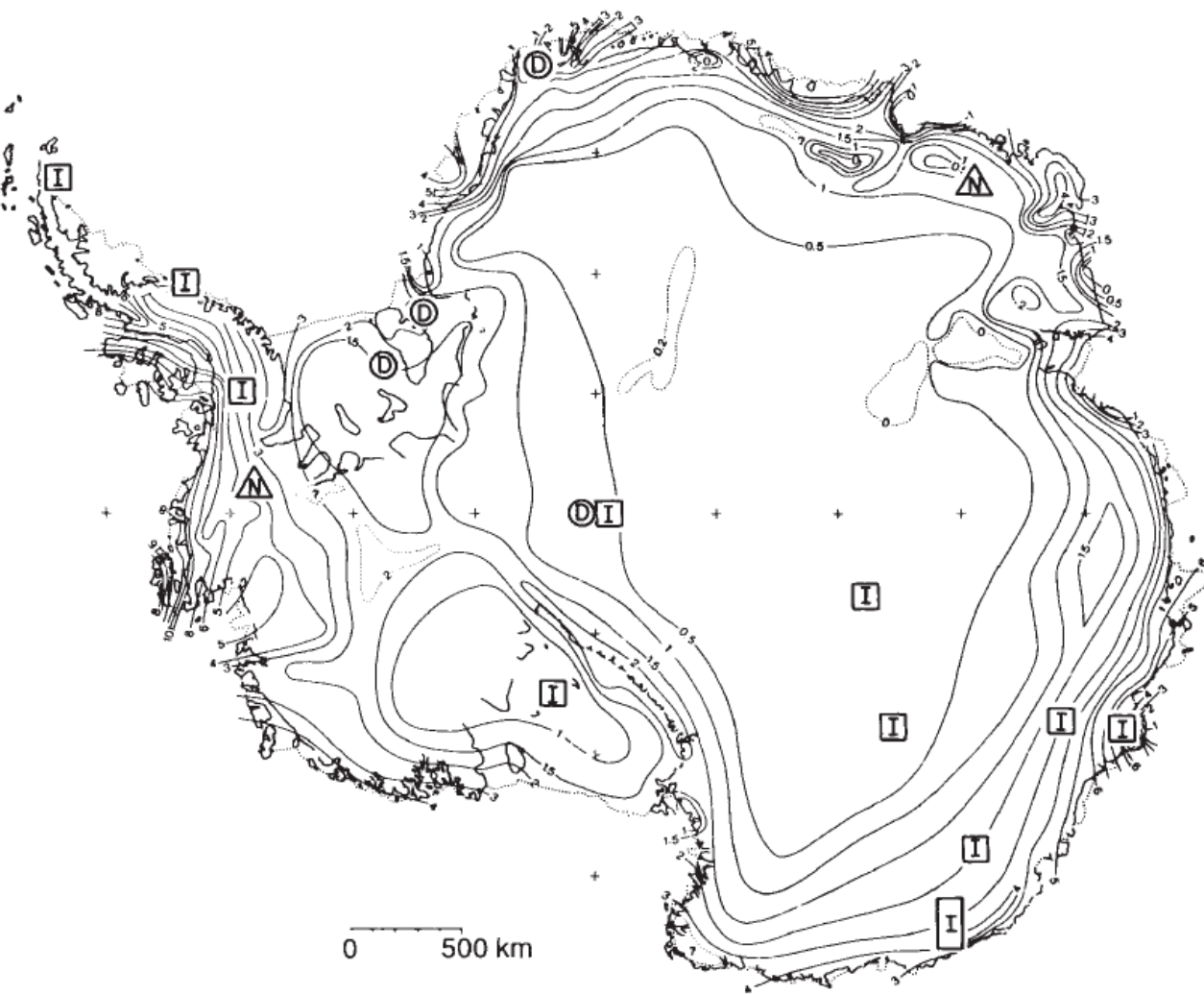
Zwraca uwagę szczególnie duży wzrost temperatury w Arktyce, nawet o osiem stopni. Te same prognozy przewidują znaczny wzrost opadów w Arktyce (rzędu 40%)



Is the Antarctic ice sheet growing?

S. S. Jacobs

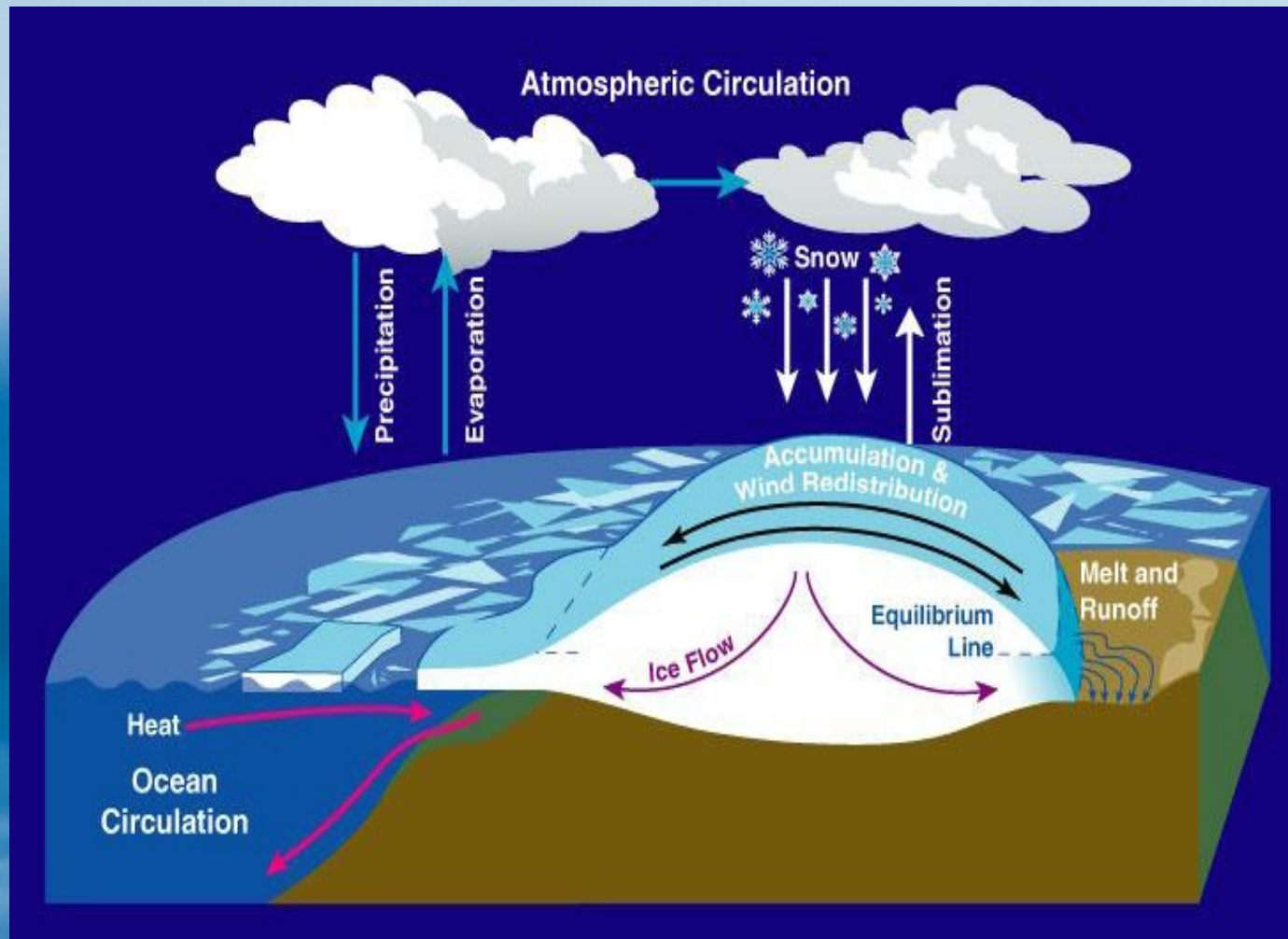
A common public perception is that global warming will accelerate the melting of polar ice sheets, causing sea level to rise. A common scientific position is that the volume of grounded Antarctic ice is slowly growing, and will damp future sea-level rise. At present, studies supporting recent shrinkage or growth depend on limited measurements that are subject to high temporal and regional variability, and it is too early to say how the Antarctic ice sheet will behave in a warmer world.



Jeszcze w 1992 roku można było wierzyć, że czapa lodowa Antarktydy rośnie w wyniku przewagi opadów nad parowaniem (P-E). Rysunek po lewej pokazuje (wszędzie dodatni) bilans powierzchniowy (P-E) masy lodu w $100 \text{ kg m}^{-2} \text{ rok}^{-1}$ oraz zmiany akumulacji (I – wzrost, D – spadek, N – bez zmian). W 1992 nie było jasne jak ten bilans ma się do strat wywołanych cieniem się lodowców.

Jacobs 1972 (Science)

Bilans masy lądolodu

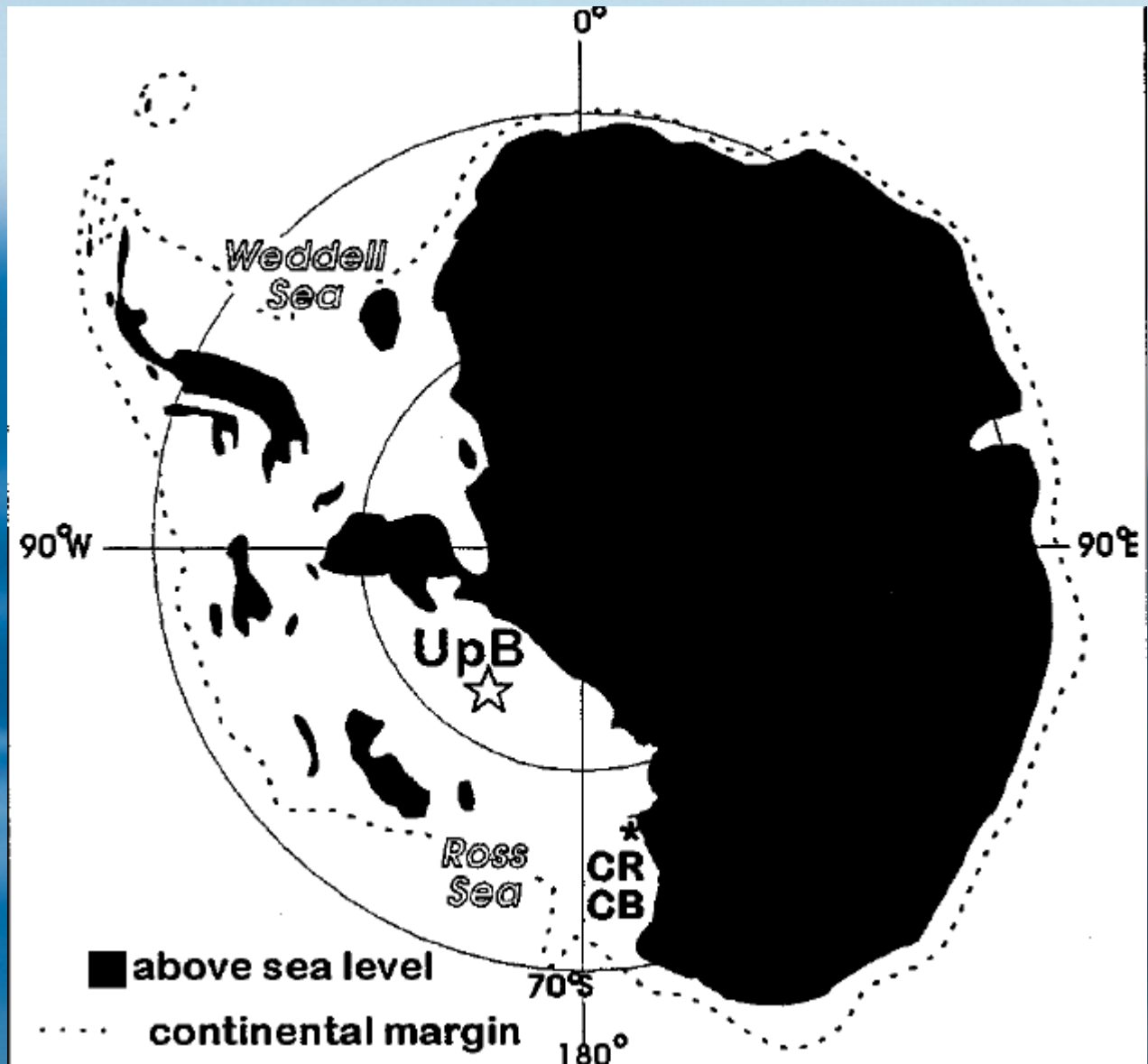


Bilans masy lądolodu (*ice-sheet*) zależy nie tylko od różnicy P-E (opady głównie śniegu, a “parowanie” to także sublimacja), a także od ilości lodu stojącego się pływającą barierą lodową (*ice-shelf*) oraz wycieku wody po powierzchni, z wnętrza i spod lodowca.

Antarktyda bez lodu

Prawie cała Zachodnia Antarktyda to lądolód spoczywający na dnie morza szelfowego. Wiercenia przez lód (punkt „UpB”) wykazały, że Zachodnia Antarktyda była morze przynajmniej raz w ciągu ostatnich 750 tys lat. Stopienie Zachodniej Antarktydy oznacza wzrost poziomu morza o 5-6 m, (a nawet zaledwie 3.3 m wg najnowszych ocen – Bamber et al 2009) Wschodniej Antarktydy (co nie zdarzyło się od kilku milionów lat) o około 60 m.

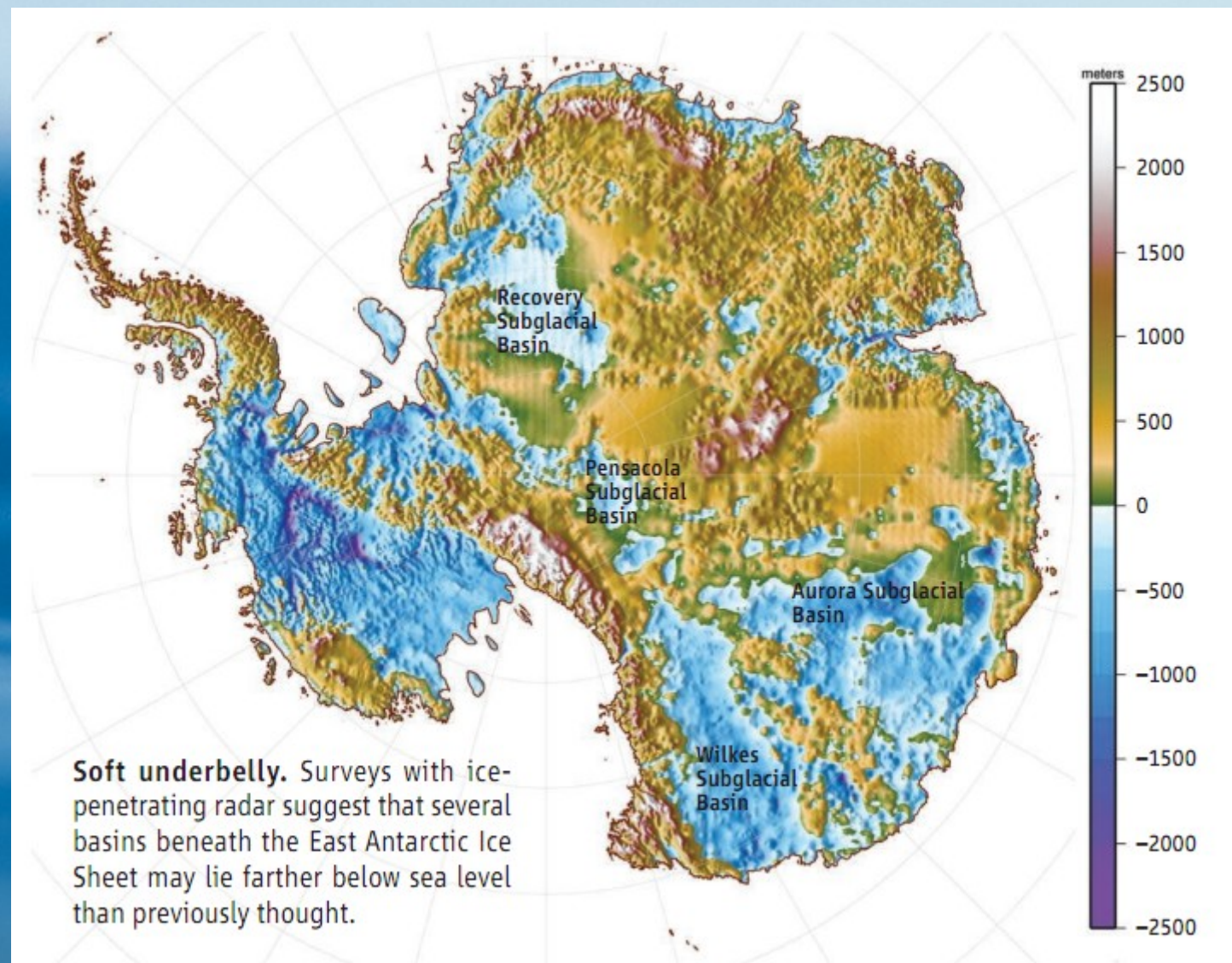
Różnica pochodzi stąd, że lód Zachodniej Antarktydy już spoczywa na dnie morza.



Nie tylko Zachodnia Antarktyda jest “na dnie”

Okazuje się, że także duże obszary lądolodu Wschodniej Antarktydy spoczywają na gruncie poniżej dzisiejszego poziomu morza.

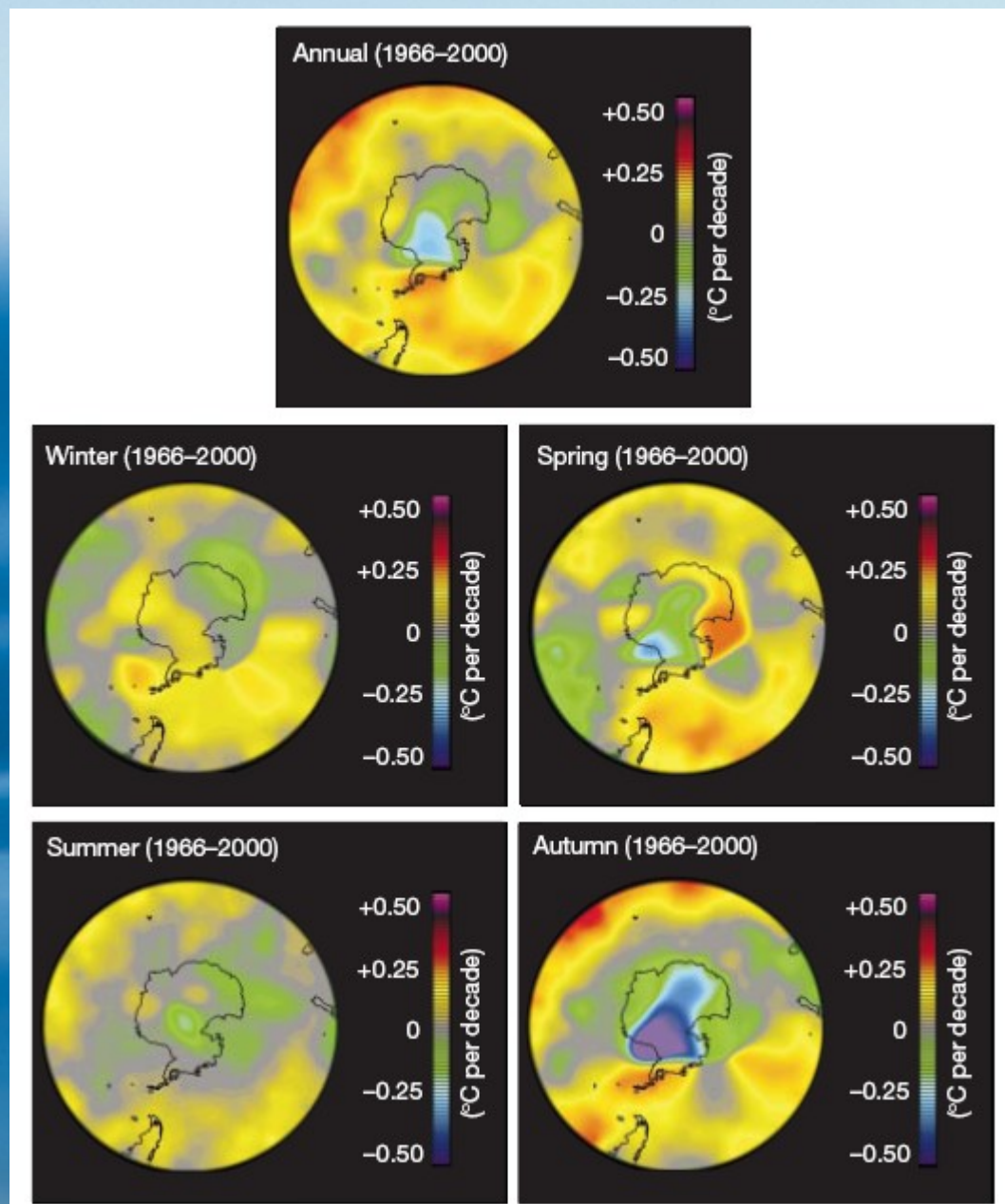
Oznacza to, że lądolód Wschodniej Antarktydy jest także zagrożony szybką (w skali geologicznej) dezintegracją



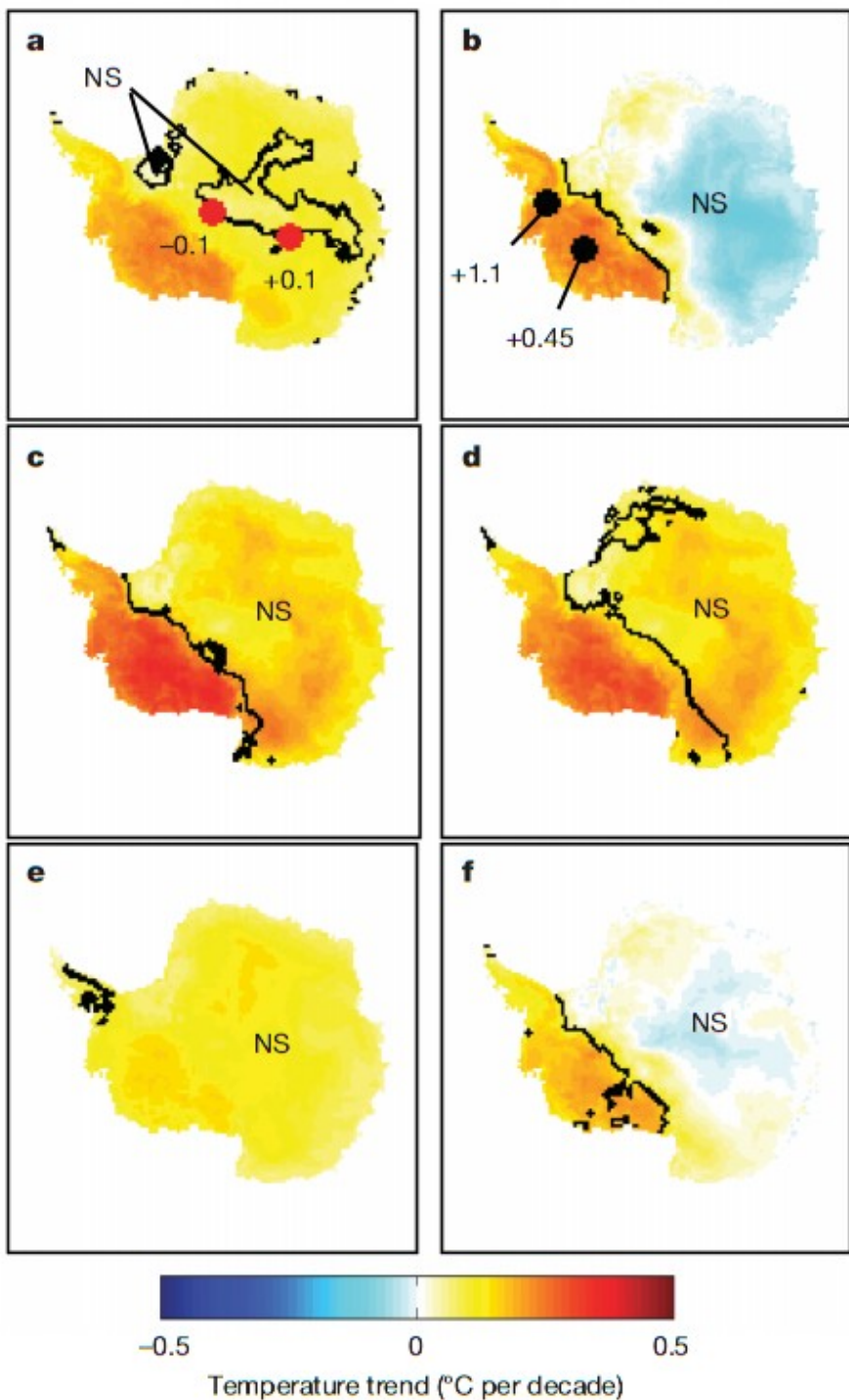
Czy Antarktyda staje się coraz zimniejsza? (2002)

Interpolacja (niezwykle rzadkiej) sieci pomiarów meteorologicznych zdaje się świadczyć o trendzie ochładzania się wnętrza Antarktydy w latach 1966-2000, szczególnie latem i jesienią (ale także całorocznie (na górze)).

Oziębienie (przynajmniej stratosfery) nad Antarktydą związane jest z pogłębianiem się dziury ozonowej (ozon pochłania ultrafiolet przejąc stratosferę).



Czy Antarktyda staje się coraz zimniejsza? (2009)

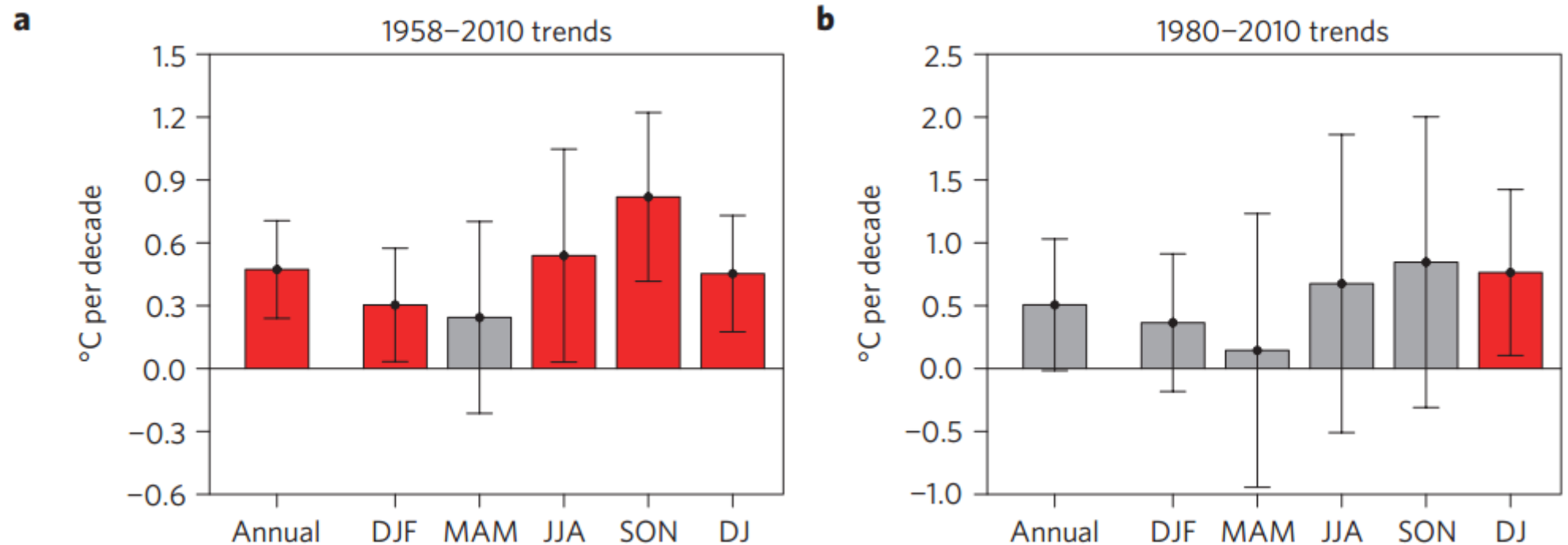


Ponowna analiza pomiarów meteorologicznych zdaje się zaprzeczać tezie o trendzie ochładzania się wnętrza Antarktydy w latach 1957-2006 (a) oraz dla porównania z Doran et al. 2002 w latach 1966-2000 (b).

Wykresy dla zimy (c), wiosny (d), lata (e) i jesieni (f) pokazują, że jedynie jesienią (MAM) Wschodnia Antarktyda staje się coraz zimniejsza. Zachodnia ogrzewa się przez cały rok ale najbardziej wiosną (SON).

Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth

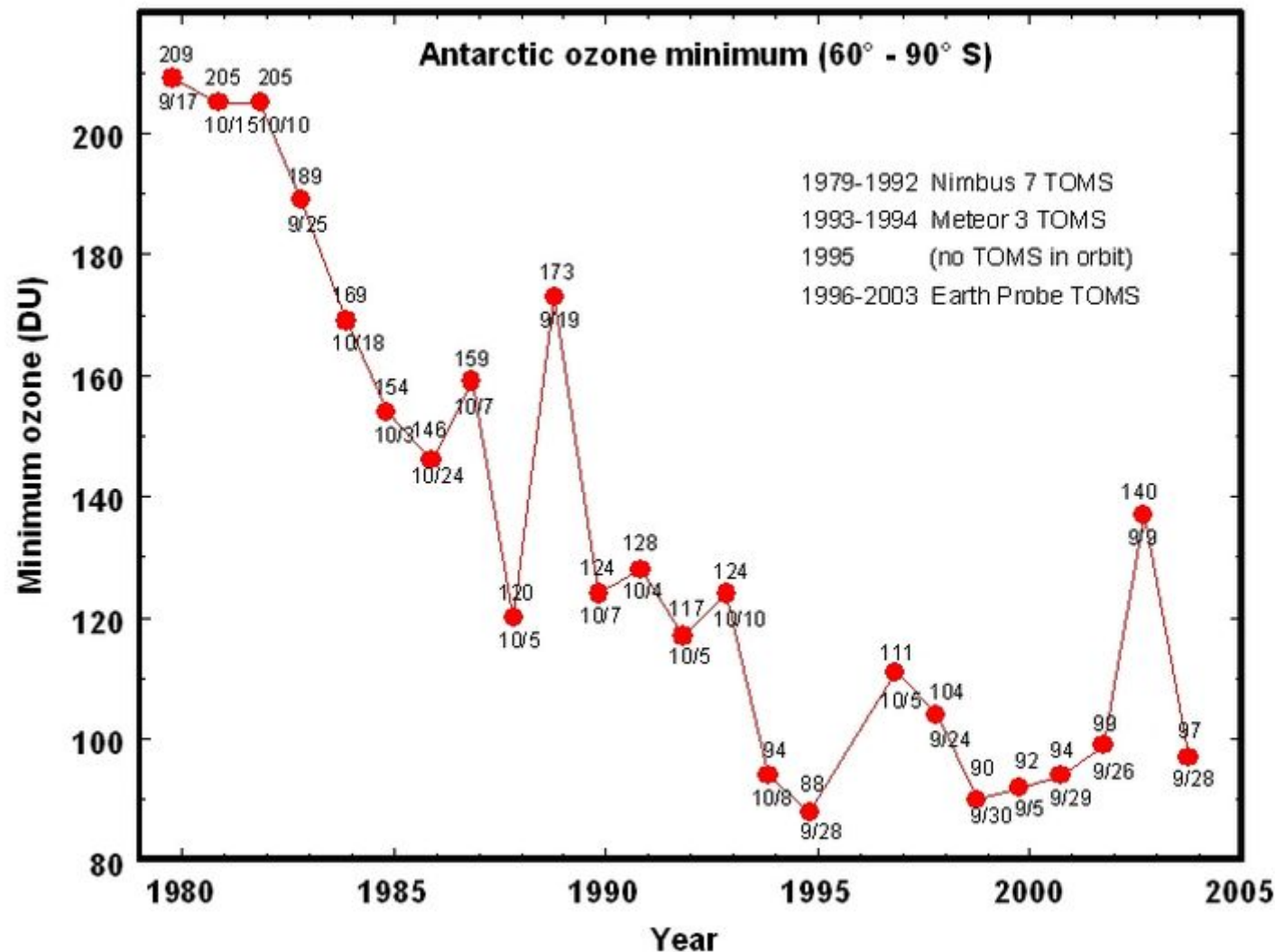
David H. Bromwich^{1★†}, Julien P. Nicolas^{1†}, Andrew J. Monaghan², Matthew A. Lazzara³, Linda M. Keller⁴, George A. Weidner⁴ and Aaron B. Wilson¹



Trendy temperatury (w stopniach na dekadę) dla stacji Byrd dla lat a) 1958–2010 i b) 1980–2010. Czerwone słupki oznaczają trendy istotne statystycznie.

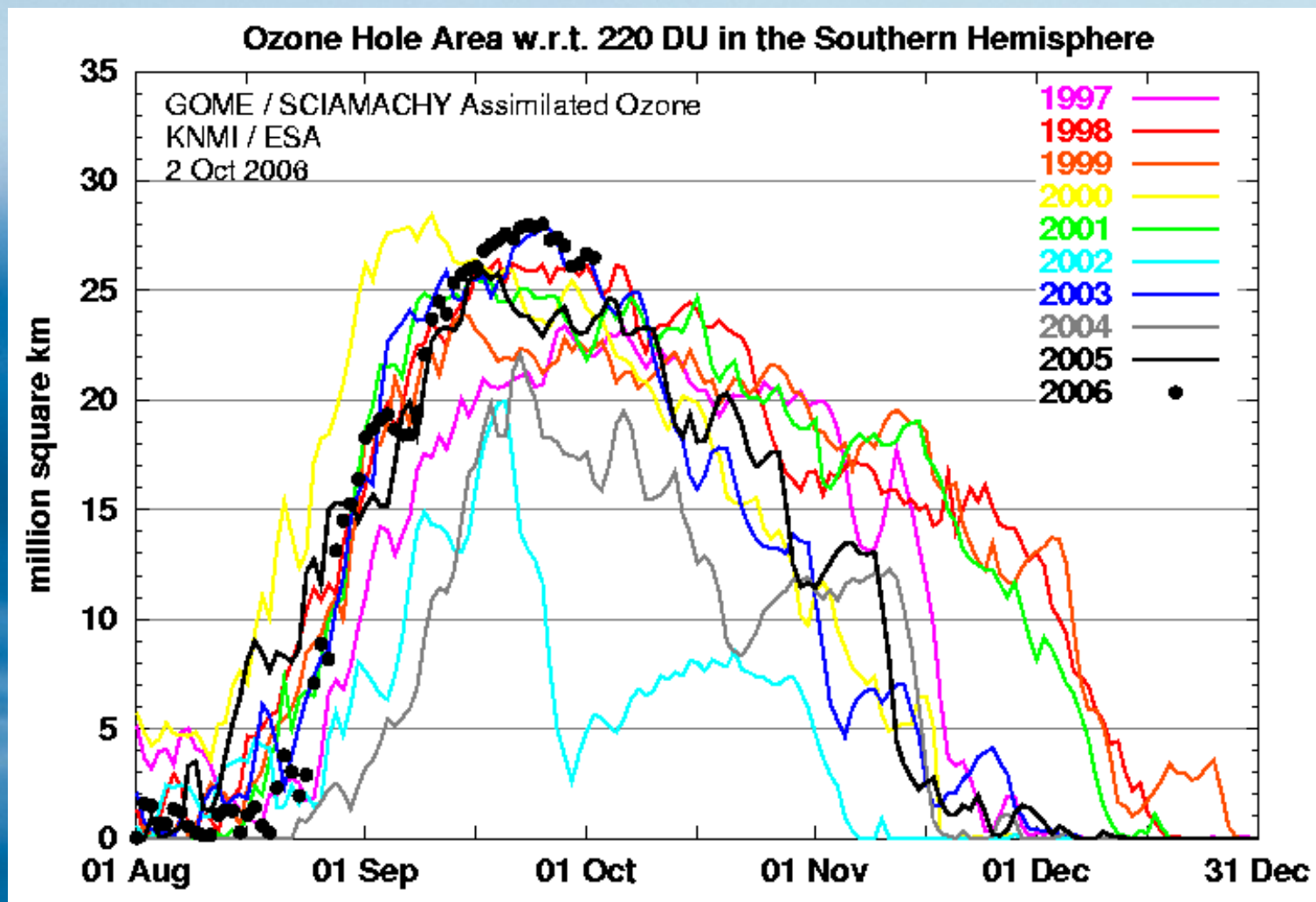
Bromwich et al. 2013 (Nature Geoscience)

Dziura ozonowa Antaktydy



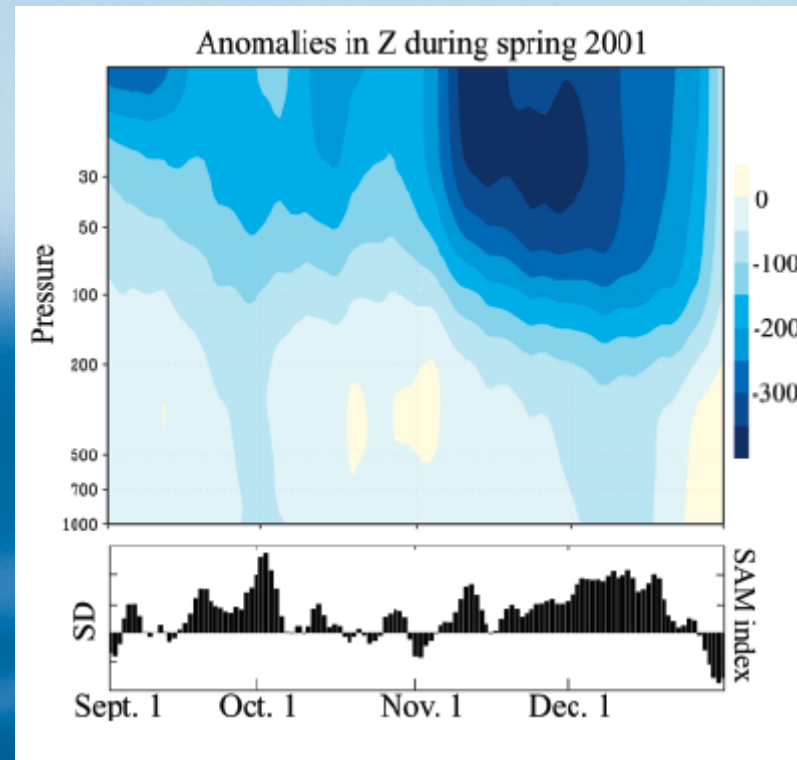
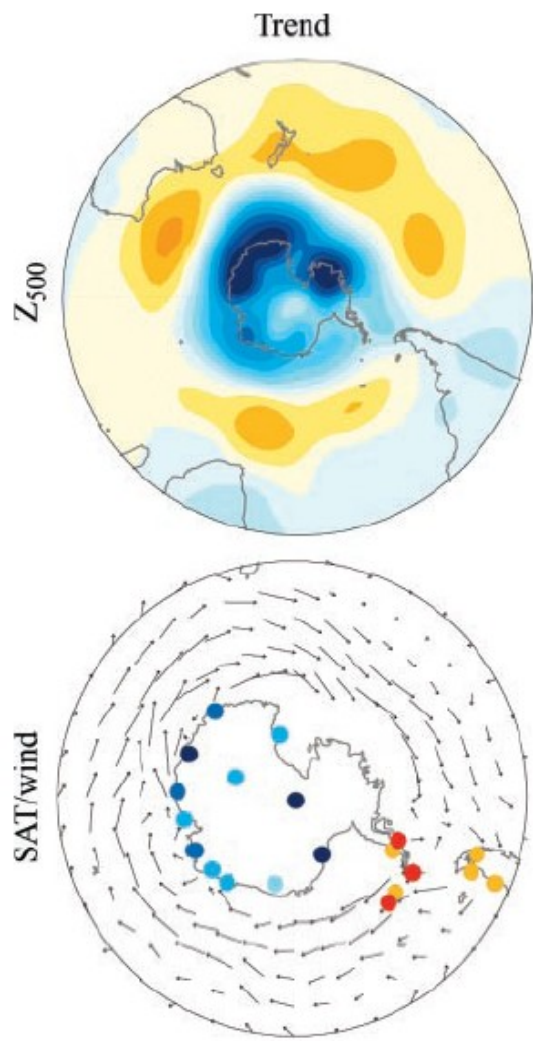
Kumulacja freonów produkowanych przez człowieka w atmosferze spowodowała spadek koncentracji ozonu nad rejonami polarnymi (obiema półkulami), z minimum w okresie wiosny.

Problem jeszcze nie zakończony



Mimo zakończenia produkcji freonów niszczących ozon stratosferyczny sytuacja nad Antarktydą jeszcze się nie poprawia (patrz czarne kropki roku 2006). Ozon osiąga maksimum wiosną półkuli południowej (przełom września i października).

Kto odpowiedzialny: ozon czy SAM?



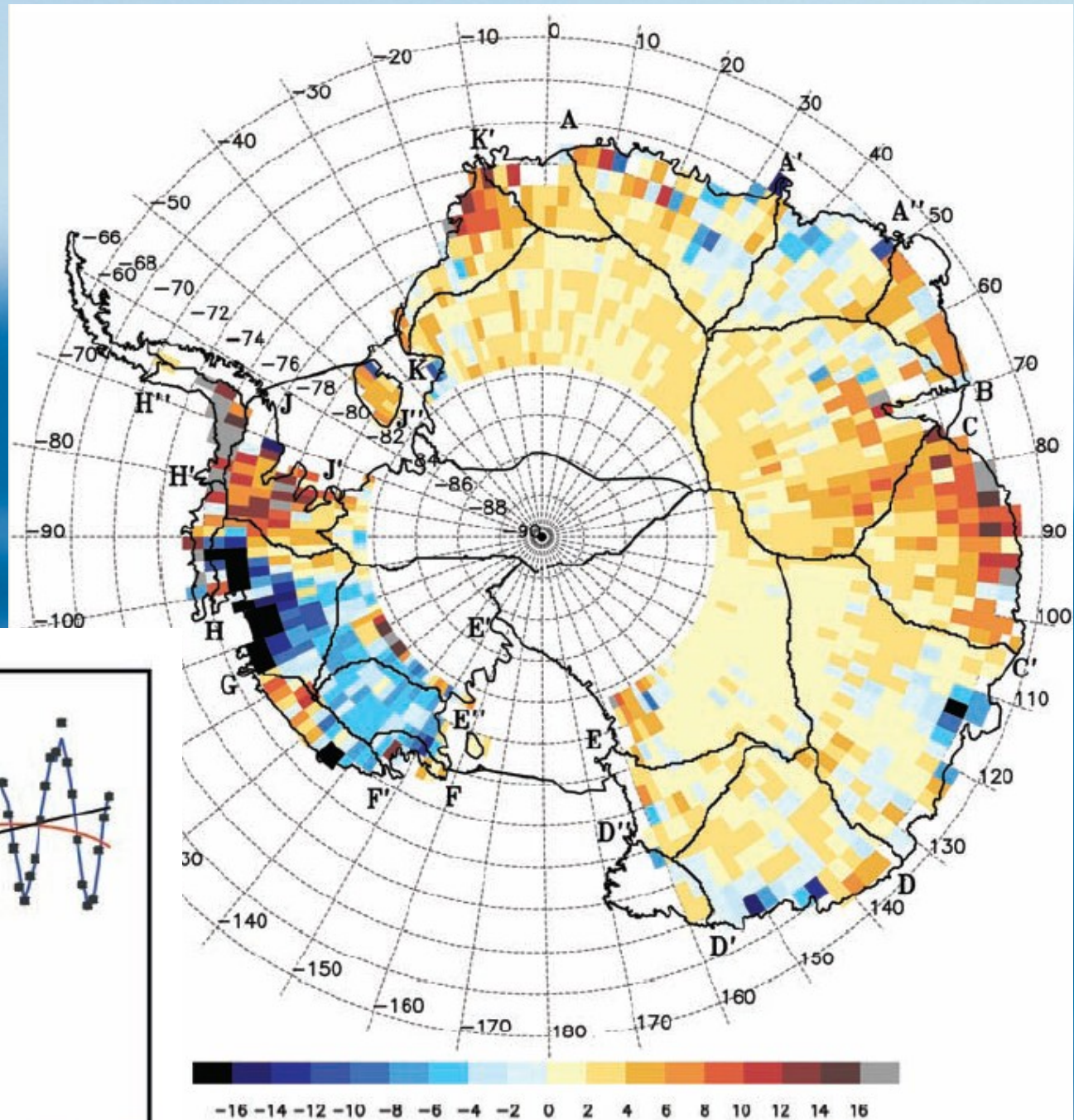
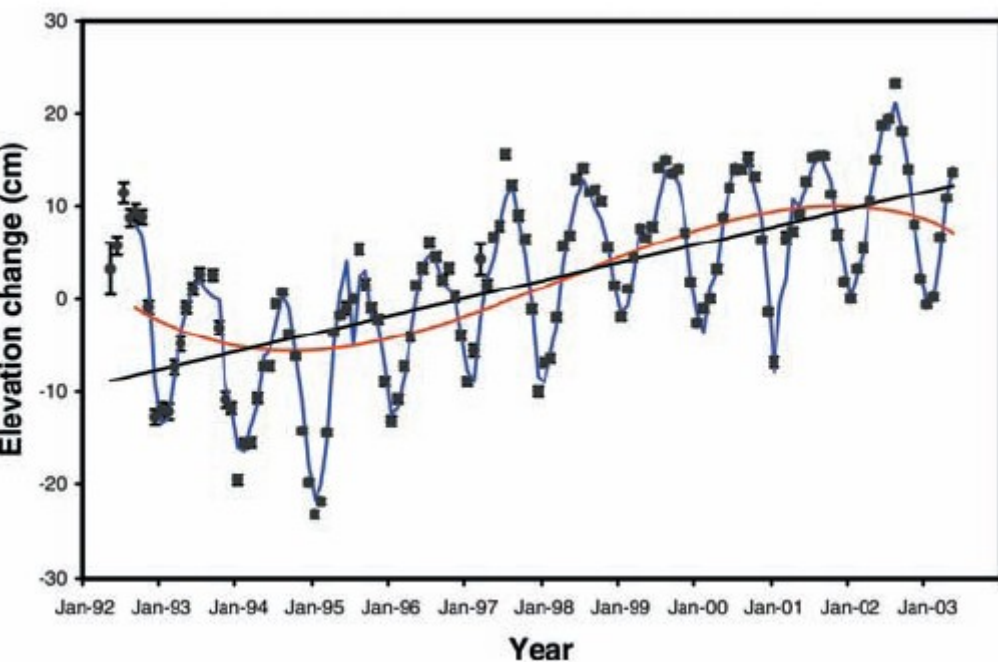
Trend (1979-2000) pogłębiania się niskiego ciśnienie i wiru antarktycznego zgodny jest z zaobserwowanym zwiększaniem się wartości indeksu SAM (południowy odpowiednik AO). Powoduje to zwiększenie odizolowania termicznego wnętrza Antarktydy (niebieskie punkty: spadek temperatur). Zmiany cyrkulacji zaczynają się od dolnej stratosfery na temperaturę której wpływ ma koncentracja ozonu. Z kolei izolacja cyrkulacji pogłębia dziurę ozonową. Co jest zatem przyczyną i czy wzrost AO ma też związek z ozonem północnej półkuli?

Thompson & Solomon 2002 (Science)

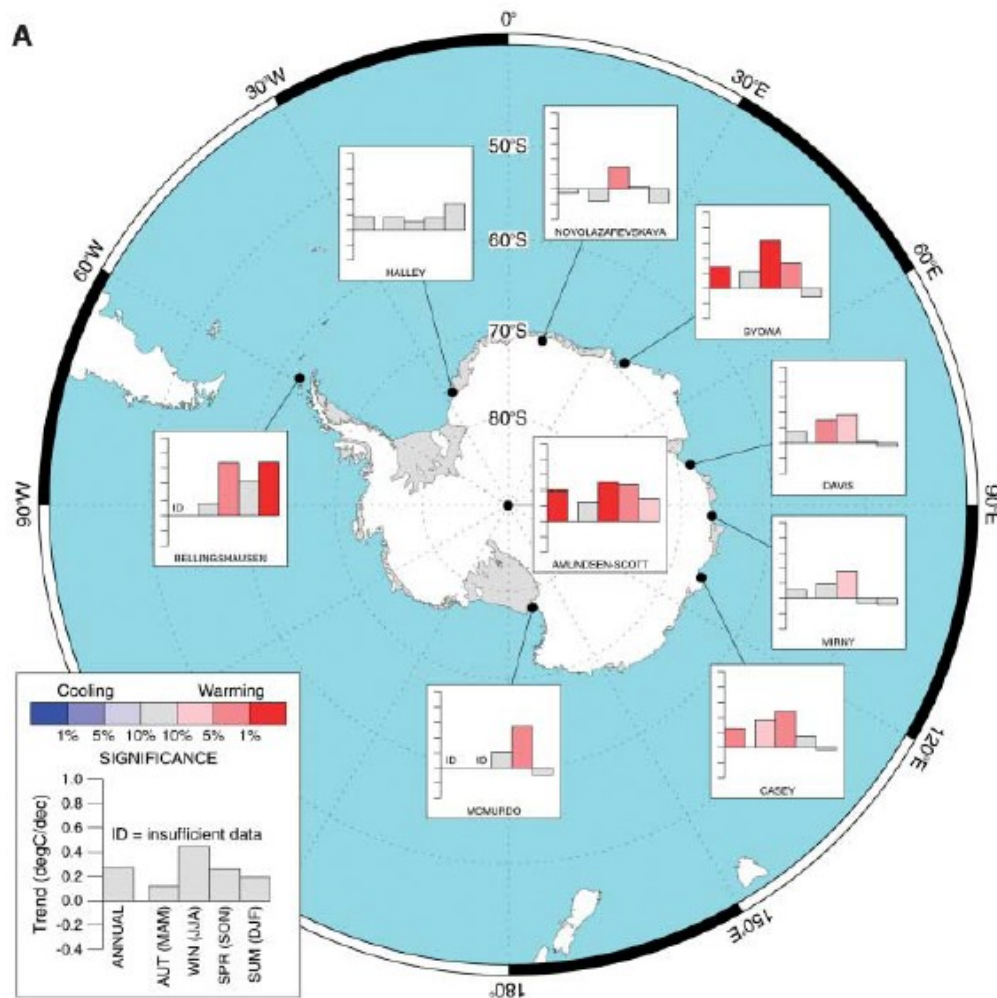
Czy przybywa lodu we Wschodniej Antarktydzie?

Satelitarna altimetria zdaje się wskazywać, że wewnątrz Antarktydy przybyło 45 ± 7 Gt rocznie (1992-2003) śniegu i lodu. Satelita nie widział poza 81.5° S. Być może źle skorygowano różnicę gęstości śniegu i lodu (mniej więcej trzykrotną).

Poniżej trend zmian dla całej Wschodniej Antarktydy.



A



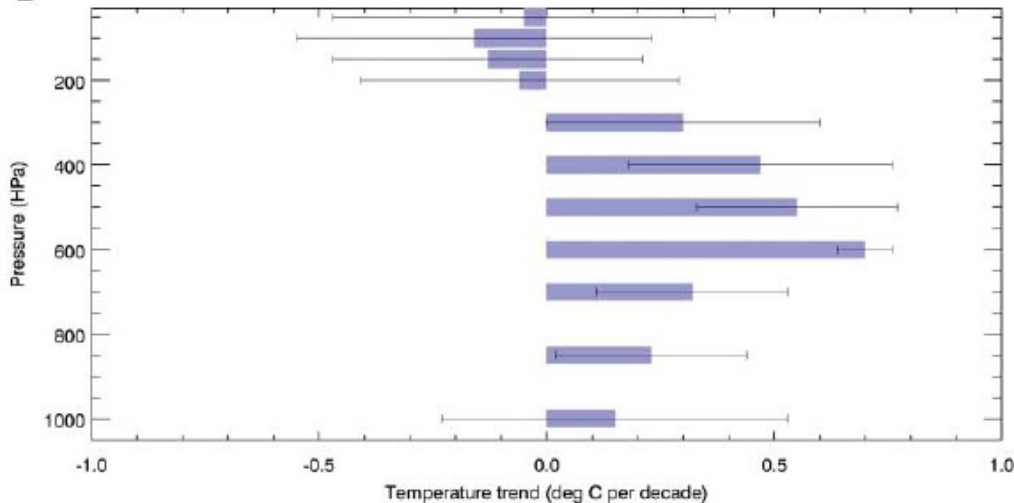
Czy jednak naprawdę się ochładza?

Trendy sezonowe z lat 1971-2003 (po lewej cały rok następnie JZWL) dla dziewięciu stacji polarnych z wieloletnimi seriami pomiarów z balonów meteorologicznych (kolor oznacza istotność trendu). Średnie ocieplenie wynosi 0.5-0.7 °C/dekadę.

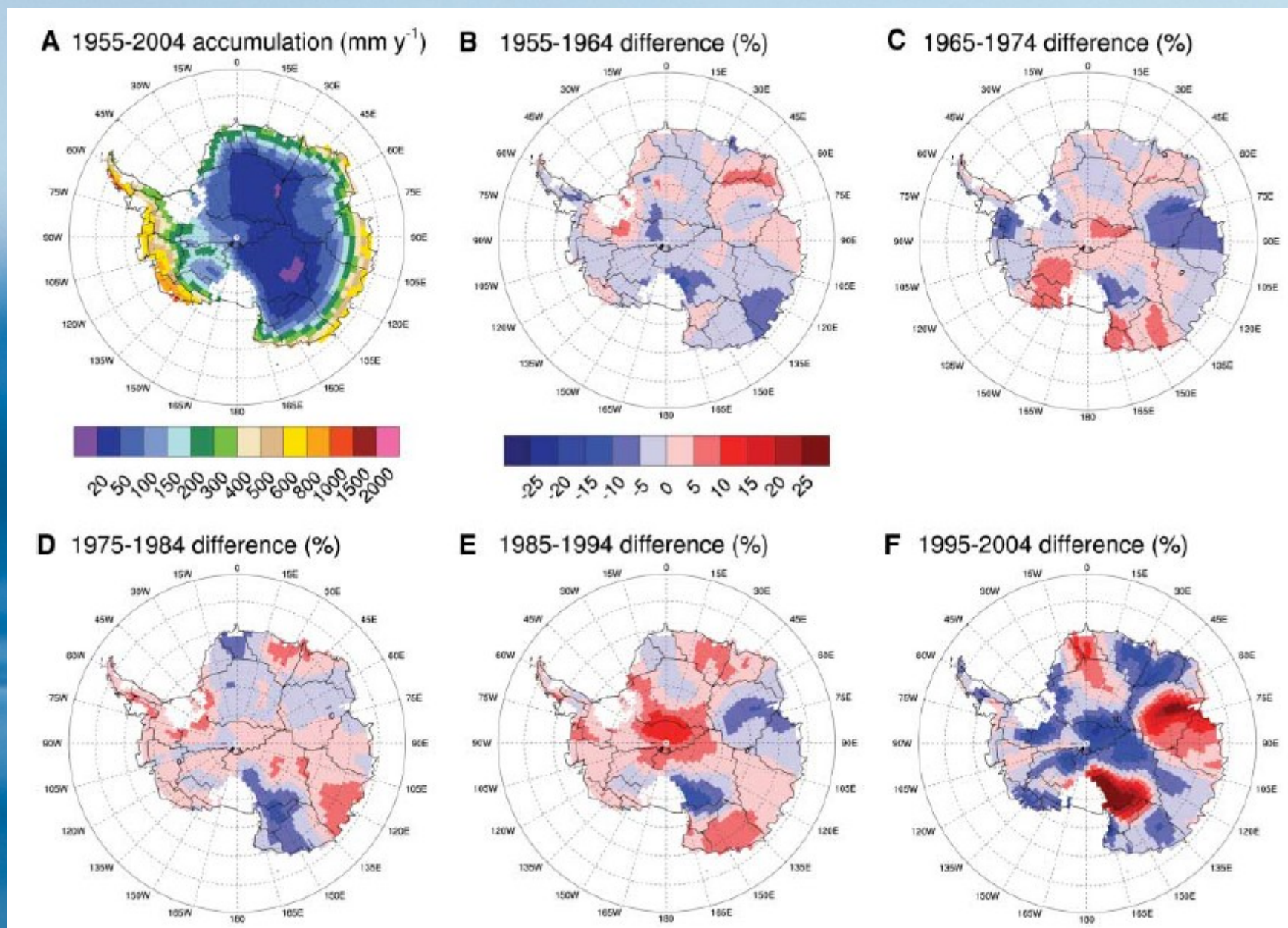
Widoczny jest trend ocieplenia dla całej troposfery z maksimum przy 500 hPa (ok. 5 km).

Czy zatem rzeczywiście Antarktyda ochładza się???

B



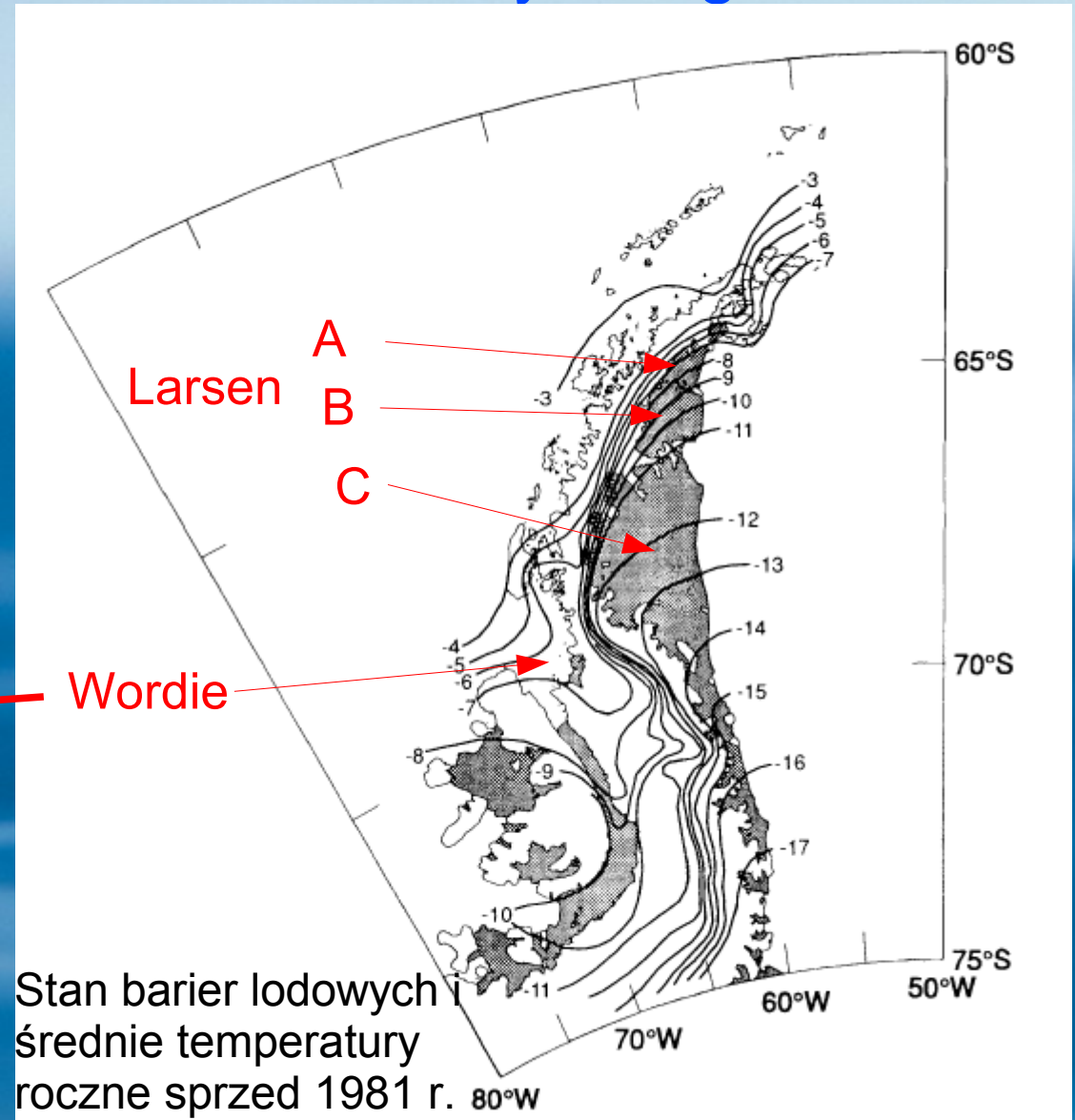
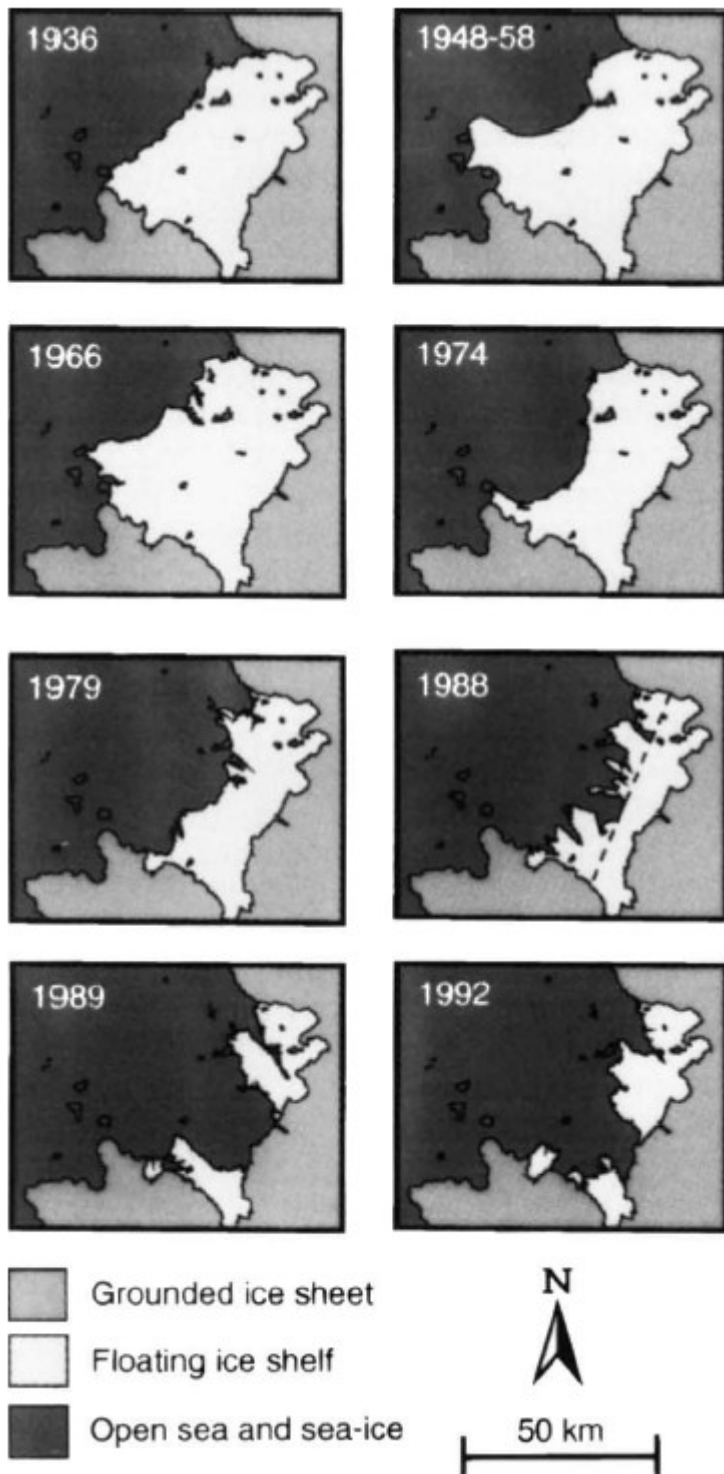
Śniegu na Antarktydzie nie pada więcej



Dane z rdzeni lodowych i modelu akumulacji nie wskazują jednak na istotny trend wzrostu opadów śniegu w ciągu ostatnich 50 lat.

Monaghan et al. 2006 (Science)

Bariery lodowe Półwyspu Antarktycznego

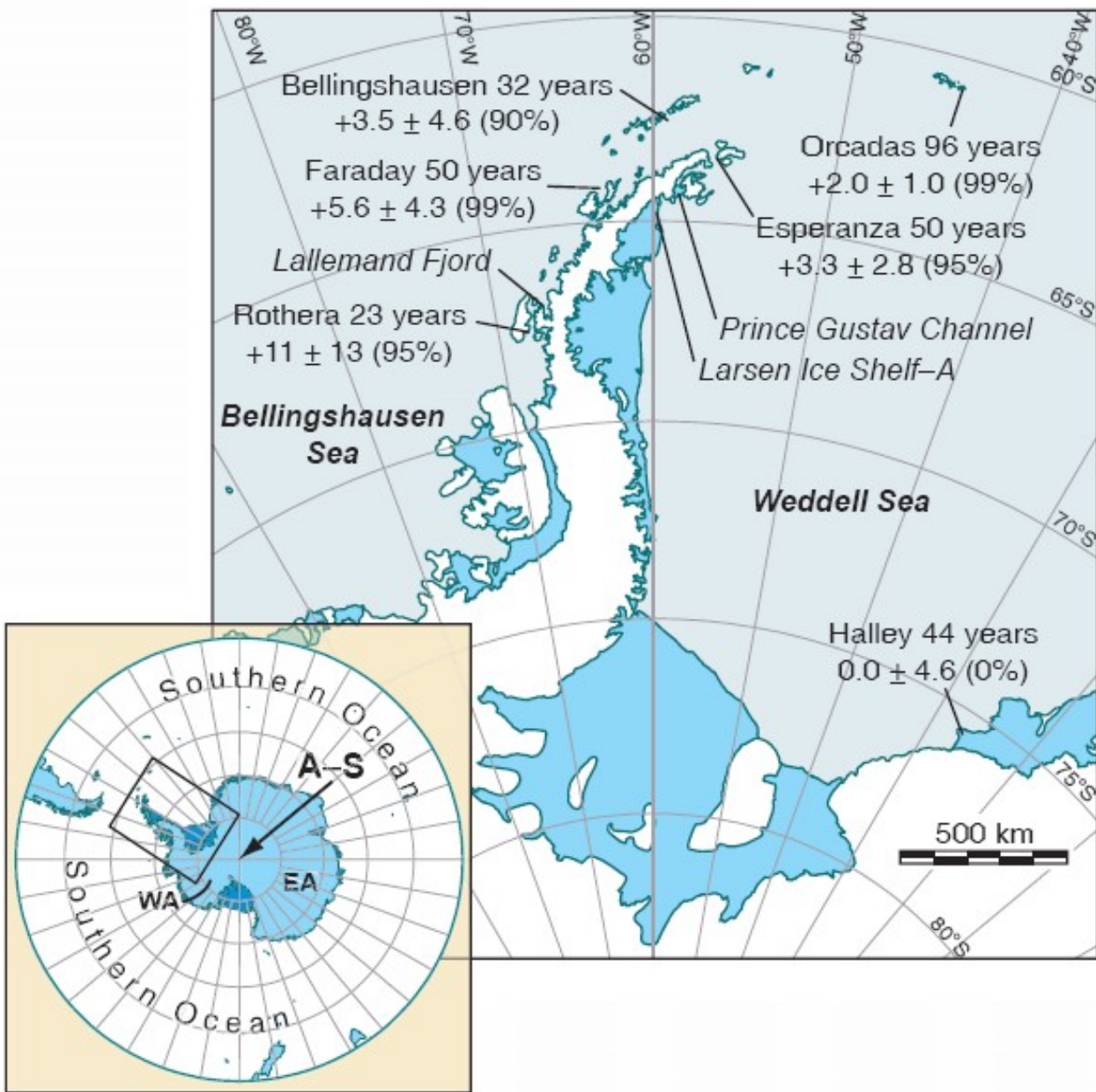


Bariery lodowe PA cofają się od około 1945 r. Są one w stanie istnieć przy średniej temperaturze rocznej $< -5^{\circ}\text{C}$.

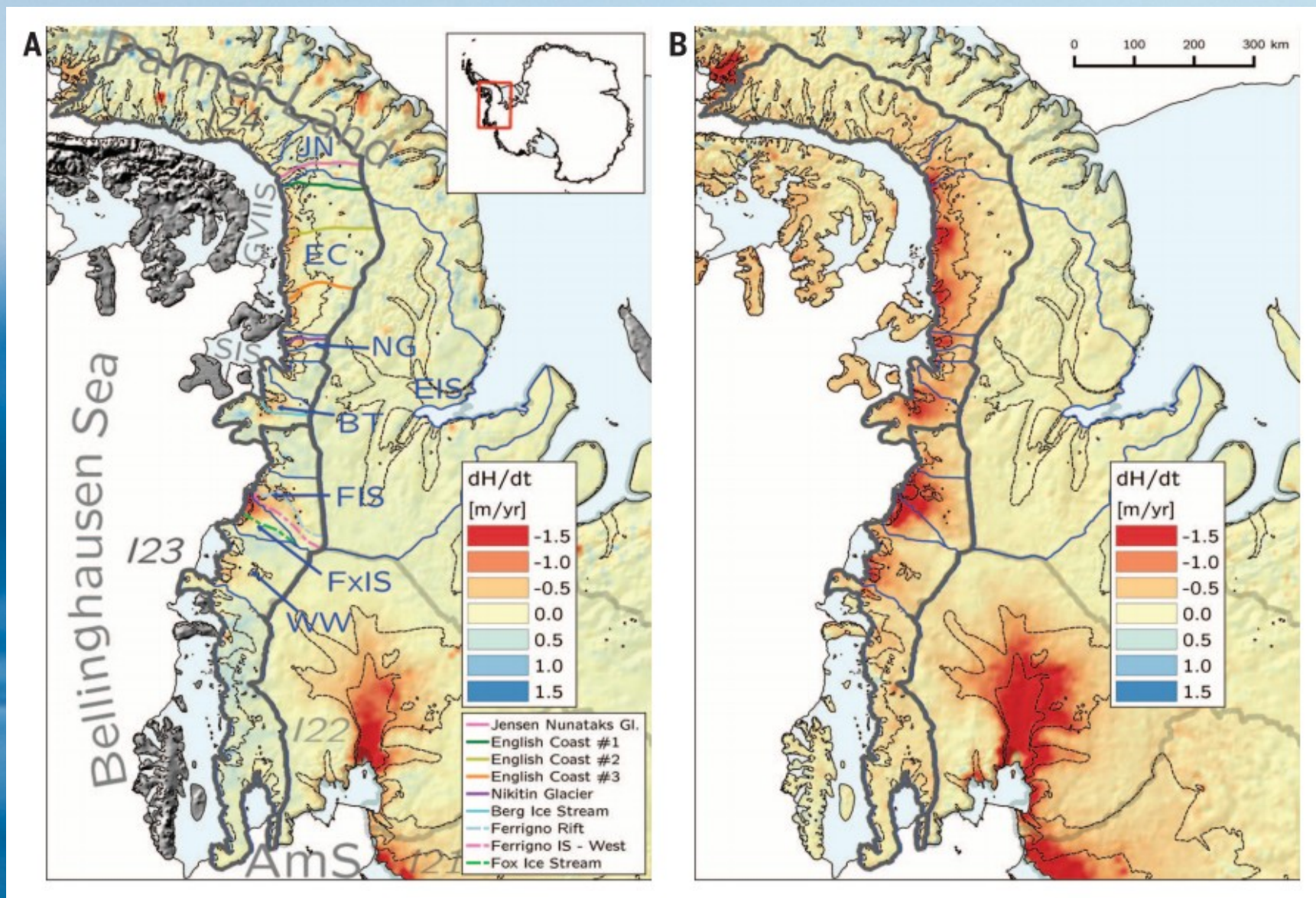
Półwysep Antarktyczny szybko się ogrzewa

Półwysep Antarktyczny jest jednym z najszybciej ogrzewających się miejsc na Ziemi.

Długości obserwacji meteorologicznych, obserwowane trendy temperatury [°C/stulecie] z błędem oraz istotność trendu.

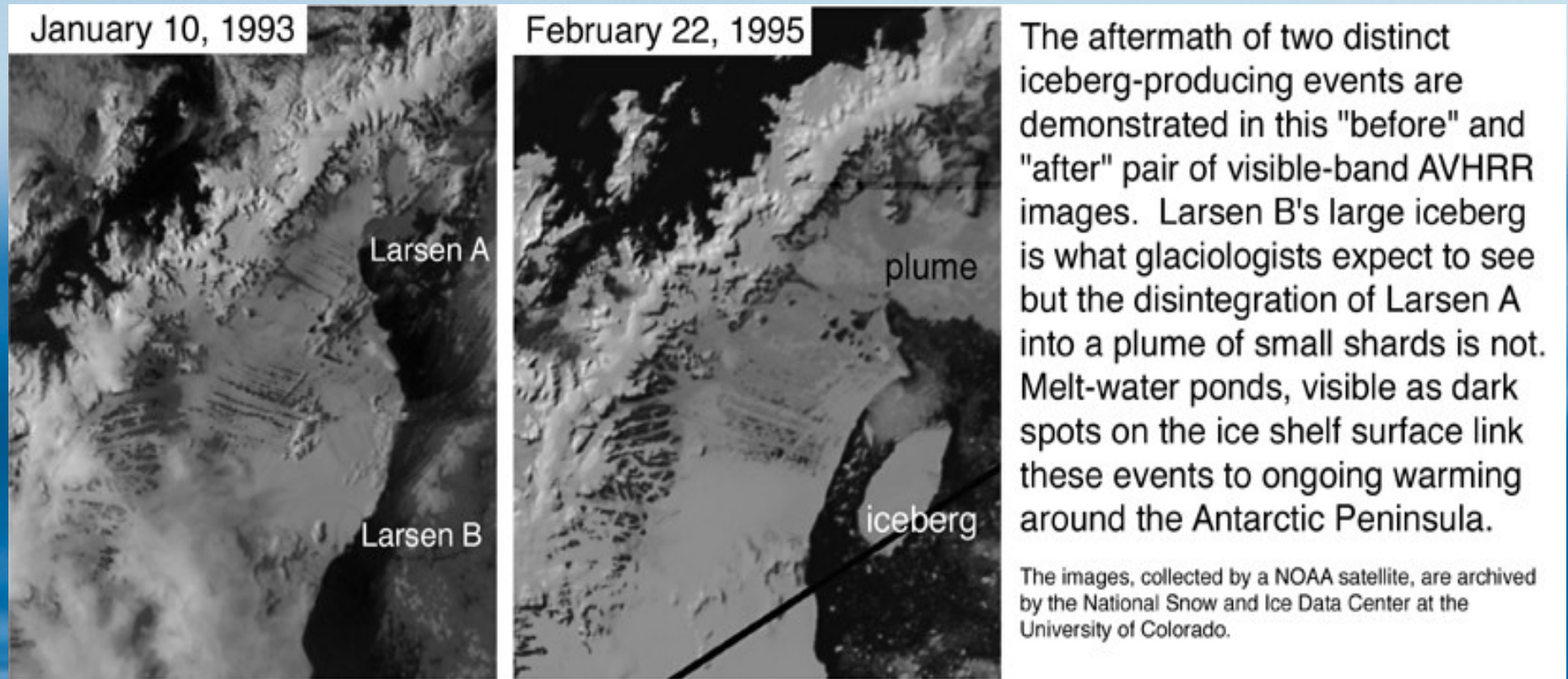


Półwysep Antarktyczny: topienie lodu



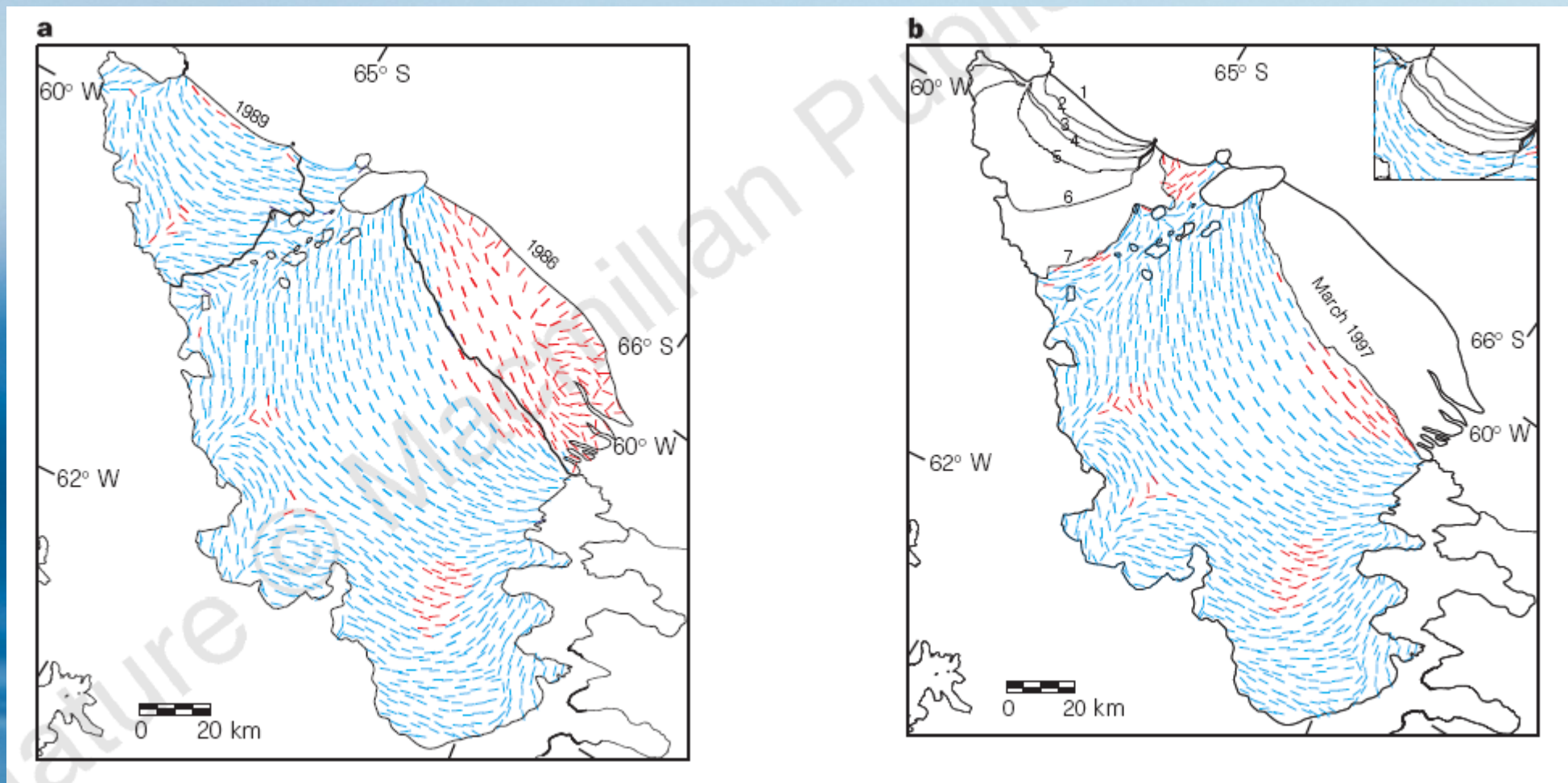
Zmiany wysokości powierzchni lodu z pomiarów altymetrycznych A) ENVISAT/ICESat (2003-2009) oraz B) Cryosat-2 (2010-2014) w metrach na rok.

Larsen-A przestał istnieć w 1995 r.



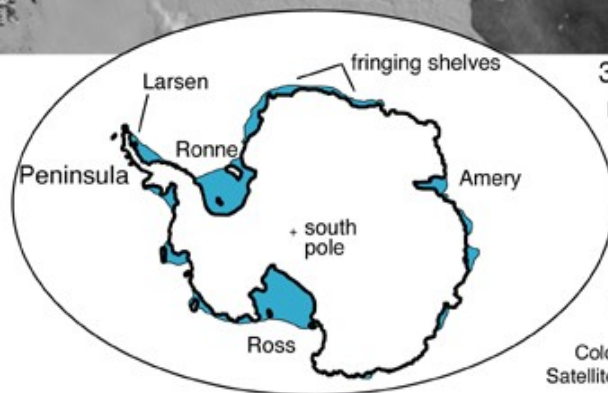
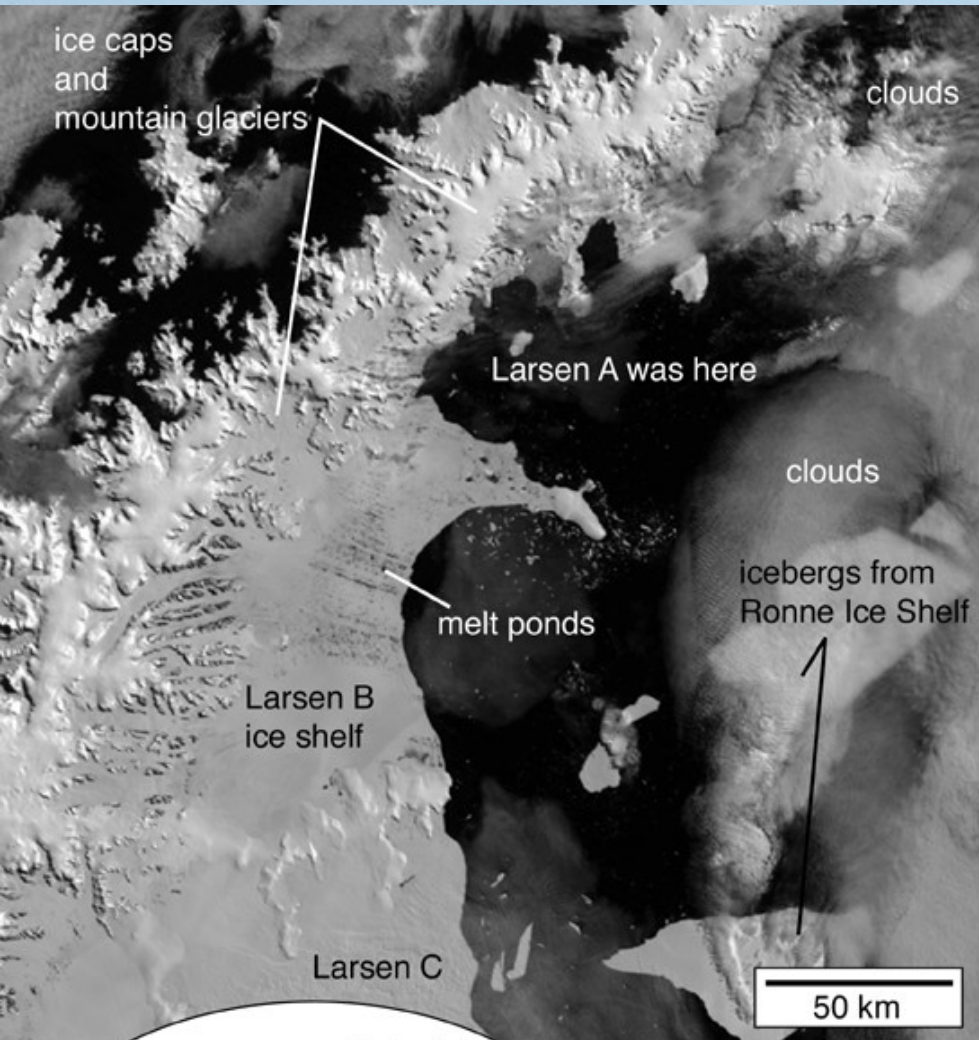
Latem 1995 od bariery lodowej Larsen-B oderwał się duży fragment (2400 km²). W tym czasie (między 5 styczniem a 16 lutym) cała bariera Larsen-A zamieniła się w pole gór lodowych.

Naprężenia w barierze lodowej Larsen



Naprężenia (niebieskie ściskające i czerwone – rozciągające w barierach lodowicy Larsen A (na górze na północ od grupy wysp) i Larsen B (nad dole) wyliczone z modelu dla lat 1986-1989 (po lewej) i 1995-1997 (po prawej). Artykuł przewidywał, że Larsen B stanie się niestabilny jeśli jego front cofnie się jeszcze o kilka kilometrów.

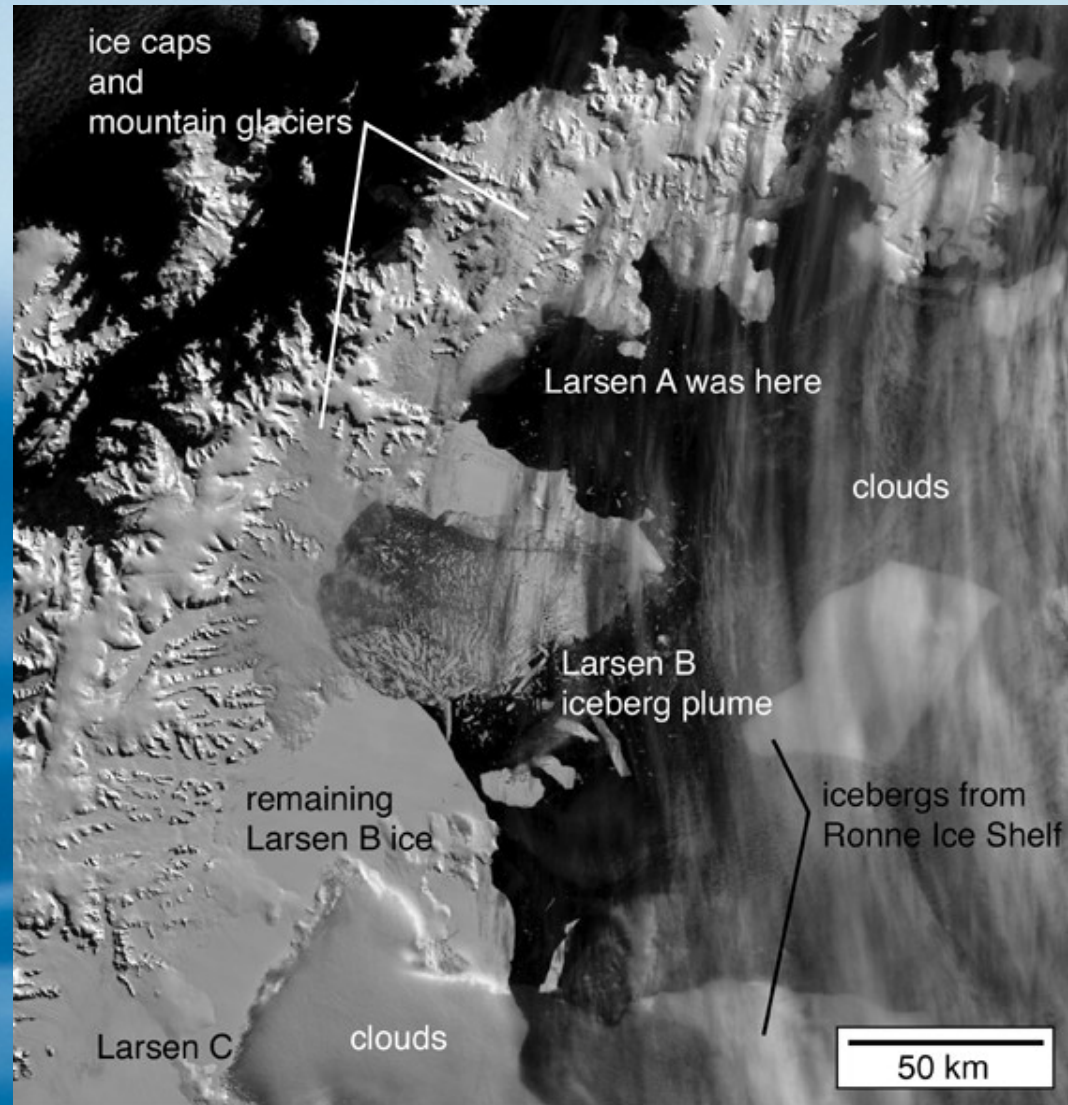
Larsen-B rozpadł się w 2002 roku



31 January 2002 image of the northeast Antarctic Peninsula

The Peninsula's fringing ice shelves are retreating, in response to recent warming.

Image courtesy of Ted Scambos, National Snow and Ice Data Center, University of Colorado. Data from MODIS, on NASA's Terra Satellite, via the Distributed Active Archive Center

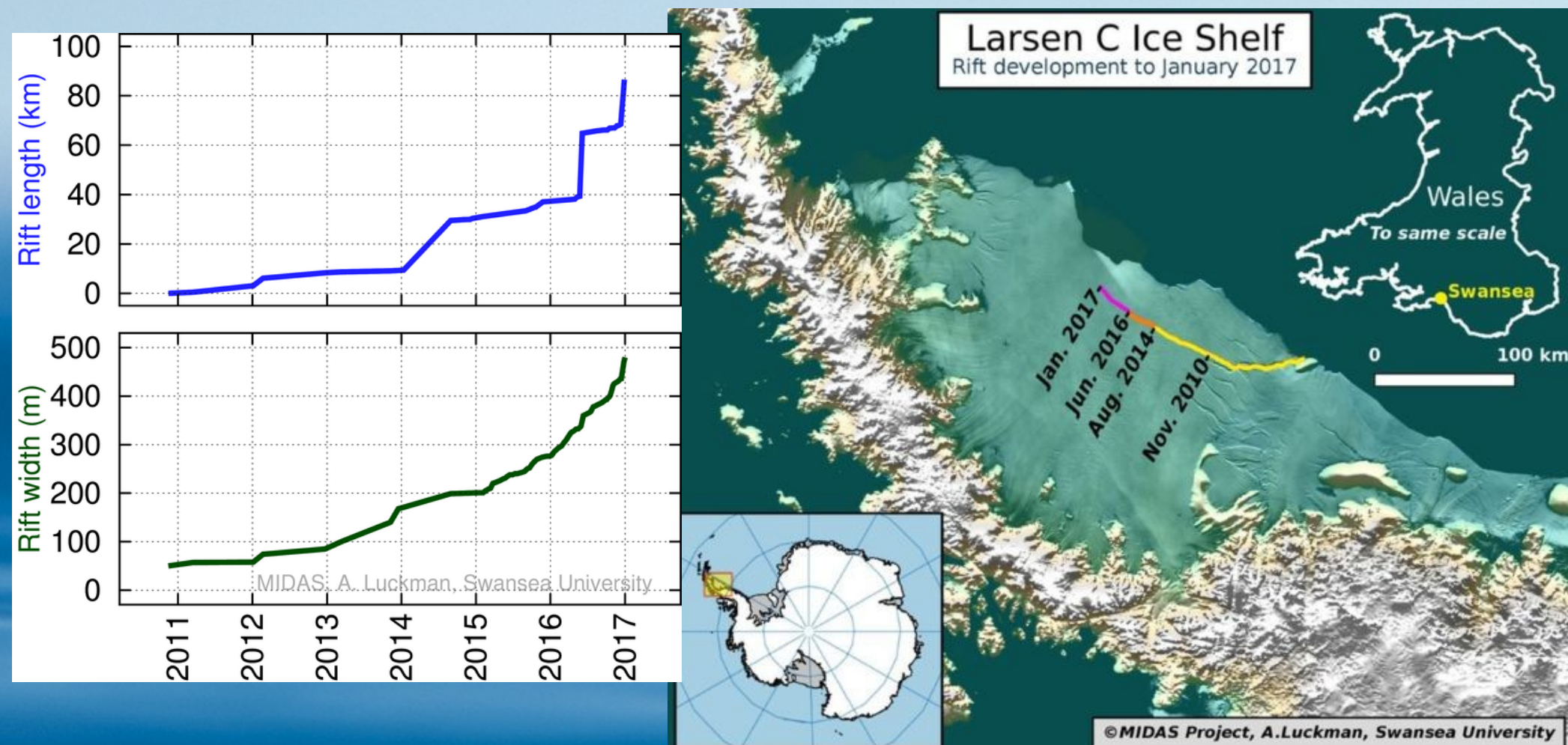


5 March 2002 image of the northeastern Antarctic Peninsula

The northern part of the Larsen B ice shelf has disintegrated, sending approximately 720 cubic kilometers of icebergs into the ocean. Because the ice was already floating, it does not affect sea level. The southern edge of the break-out tracks to the melt-pond boundary observed in the 31 January image.

Image courtesy of Ted Scambos, National Snow and Ice Data Center, University of Colorado. Data from MODIS, on NASA's Terra Satellite, via the Distributed Active Archive Center system.

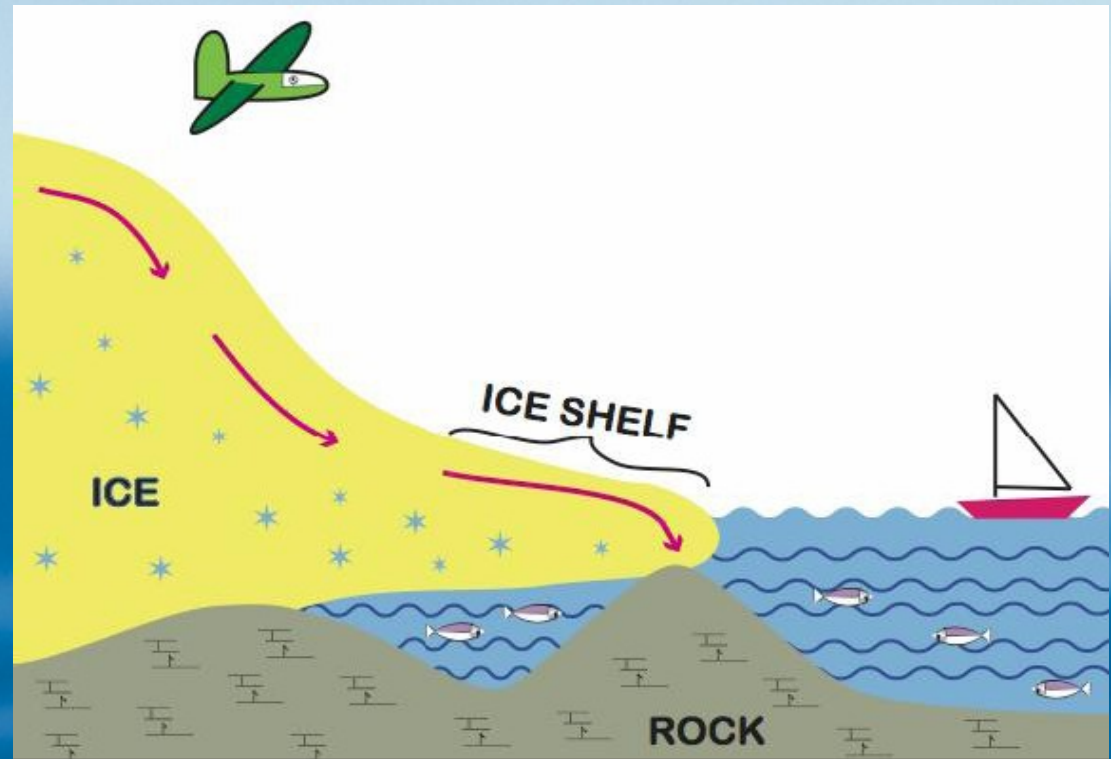
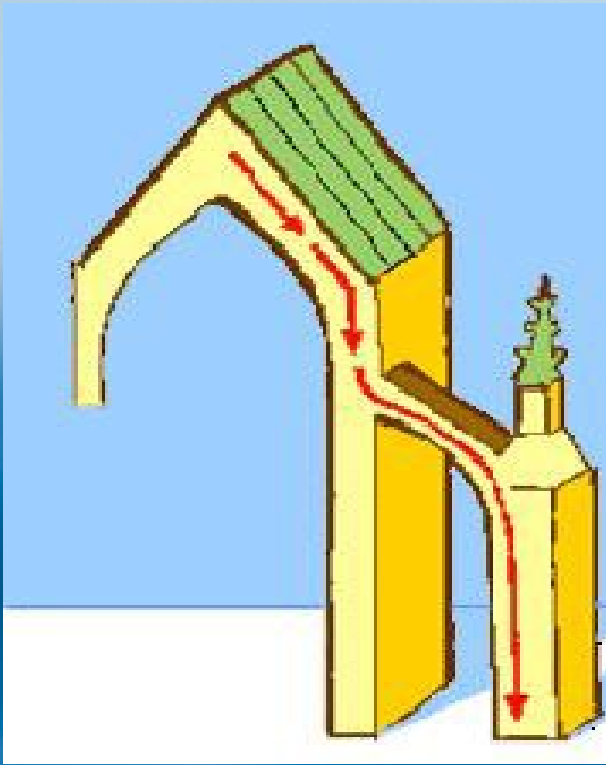
Larsen-C rozpada się w 2017 roku



Szczelina w barierze lodowej Larsen-C osiągnęła już prawie 90 km długości i 500 m szerokości. Pozostało zaledwie około 20 km do oderwania tego fragmentu. W najbliższym czasie może powstać jedna z 10 największych gór lodowych znanych nauce (5000 km²).

<http://www.projectmidas.org/blog/larsen-c-ice-shelf-poised-to-calve/>

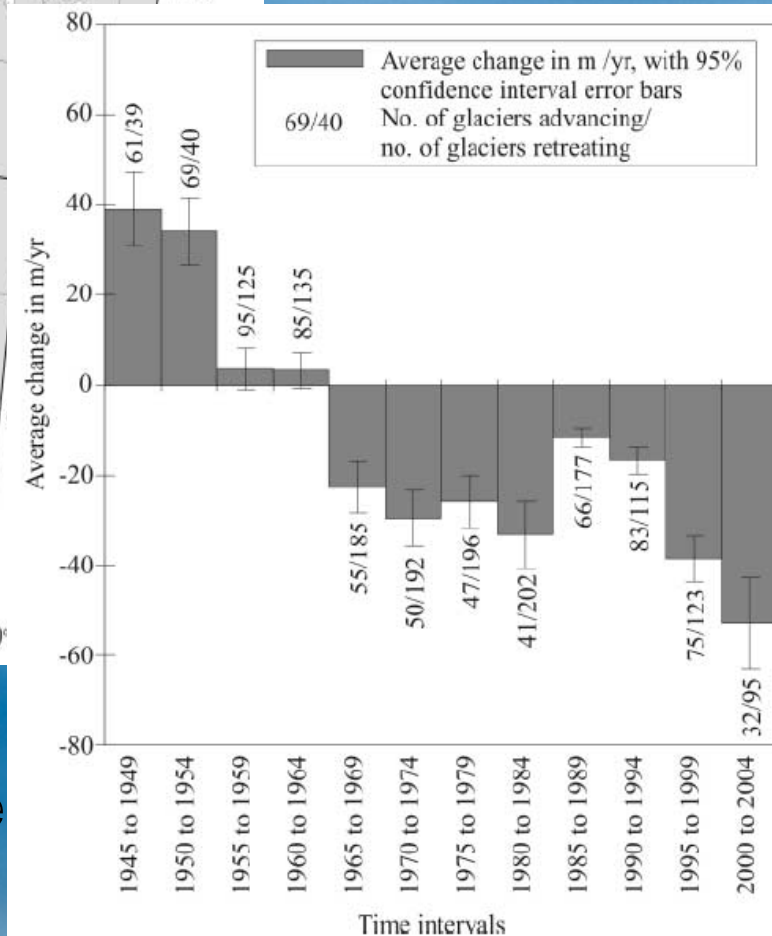
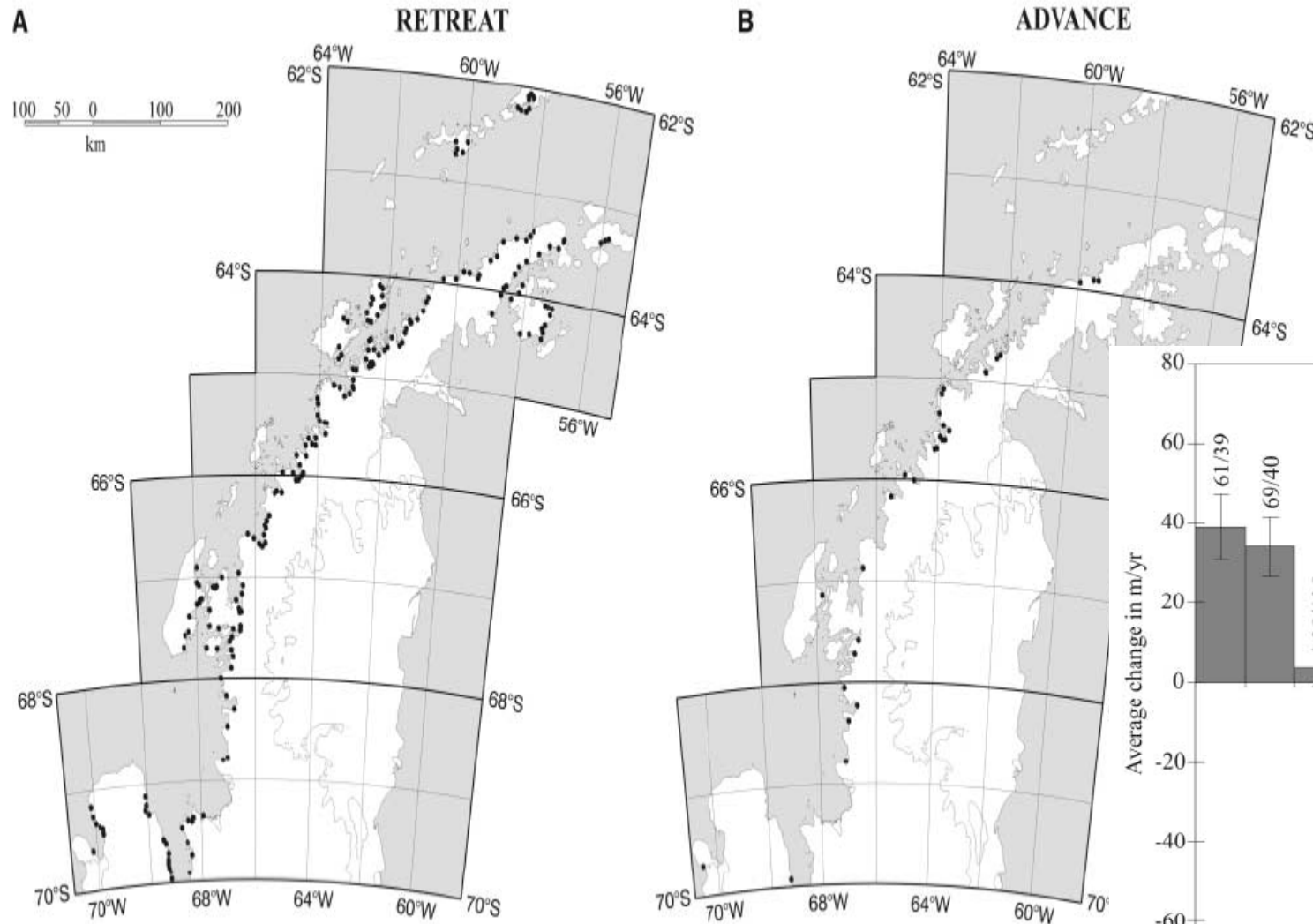
Dlaczego powinniśmy się martwić losem barier lodowych?



Istnieje hipoteza, że bariery lodowe wspierają lądolód podobnie jak łuki przyporowe (*flying buttress*) gotyckich katedr, przenosząc na siebie część ich ciężaru. Może to oznaczać przyspieszone spływanie lodu do oceanu po rozpadnięciu się barier lodowych. W ostatnich latach rzeczywiście zaobserwowano takie zjawisko.

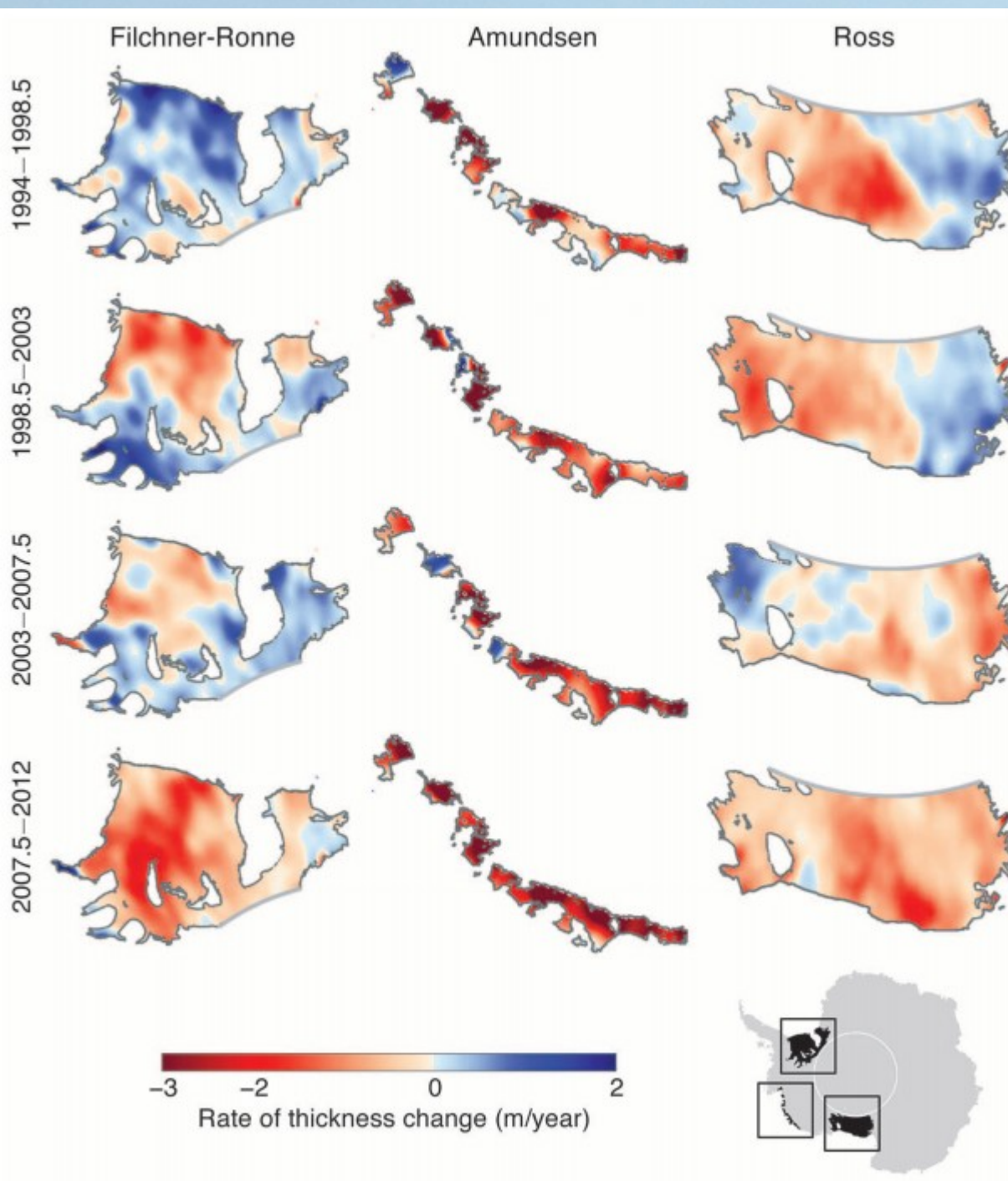
Alley 2006 (AMS polar ice meeting)

Cofanie się lodowców Półwyspu Antarktycznego



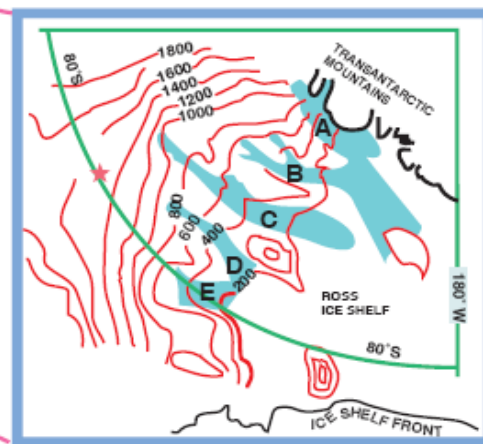
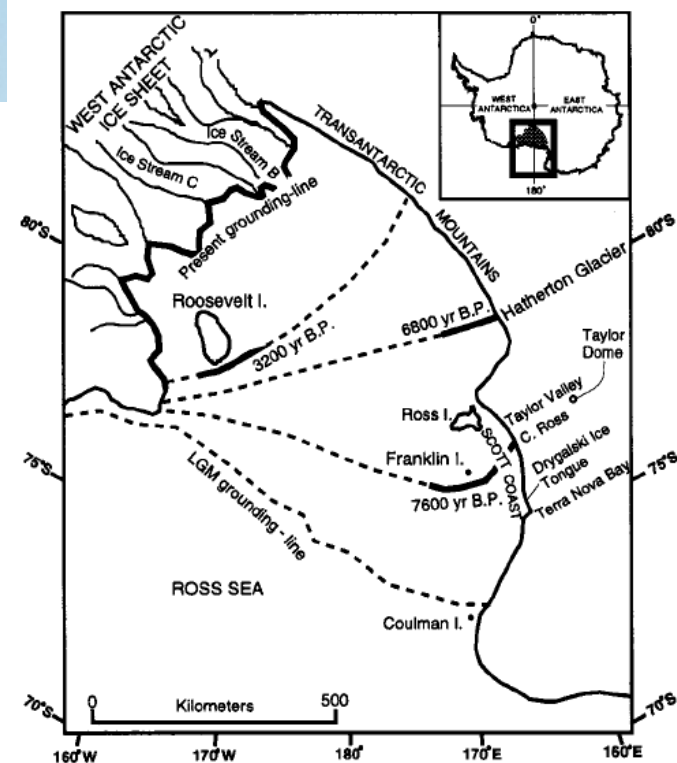
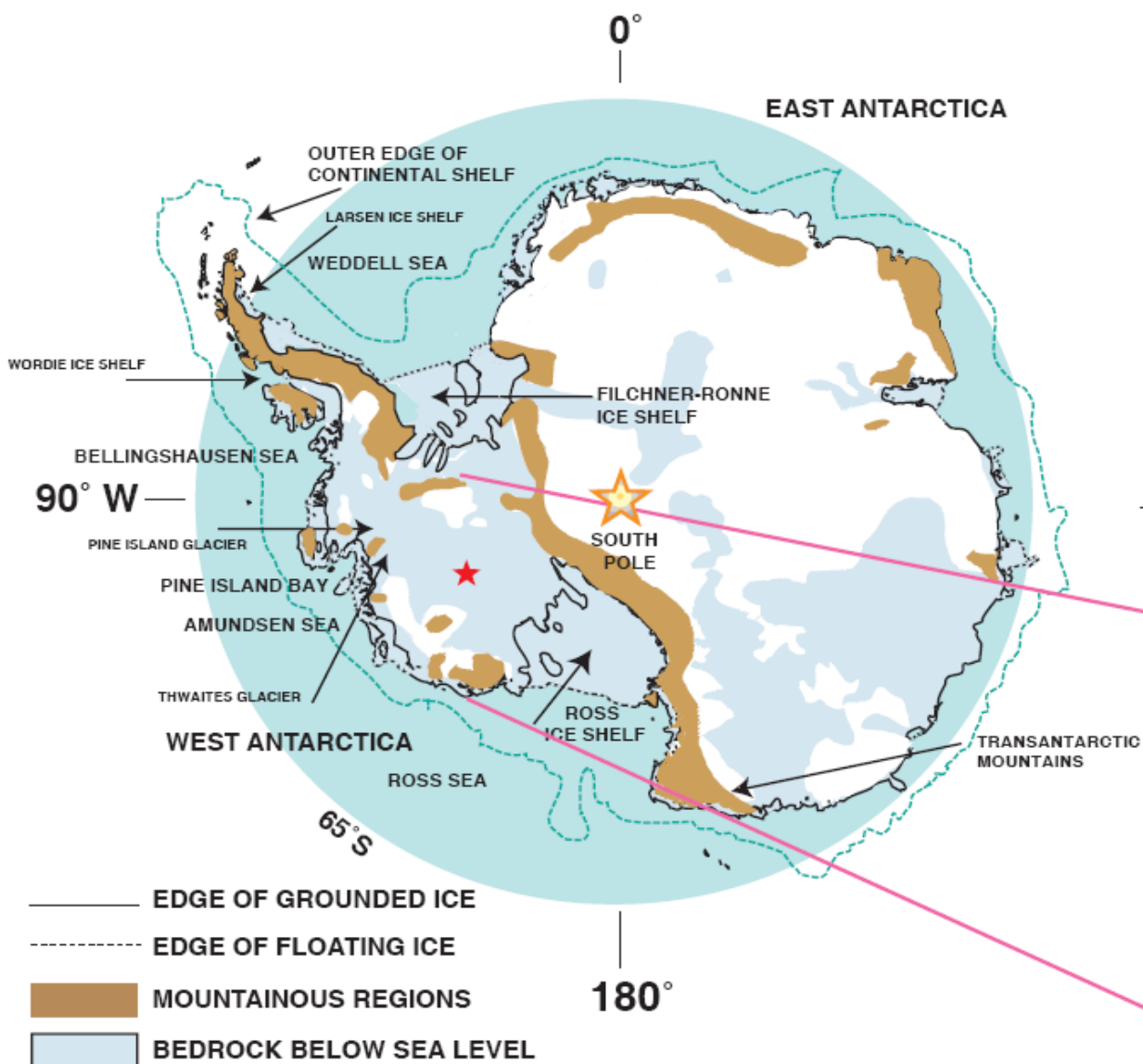
87% lodowców PA cofnęło się od czasu gdy są badane (średnio od 1953 r.). Cofanie to staje się coraz szybsze (rysunek po prawej). Zmiany pasują do zwiększenia temperatury o 3.5 °C (zakładając strefę topienia pomiędzy -9 a -5 °C)

Zmiana grubości największych barier lodowych



Zmiany grubości barier lodowych podczas 16 lat nieustannych pomiarów altymetrią radarową z satelitów (w metrach na rok). Niektóre z nich straciły 18% grubości w ciągu tego czasu.

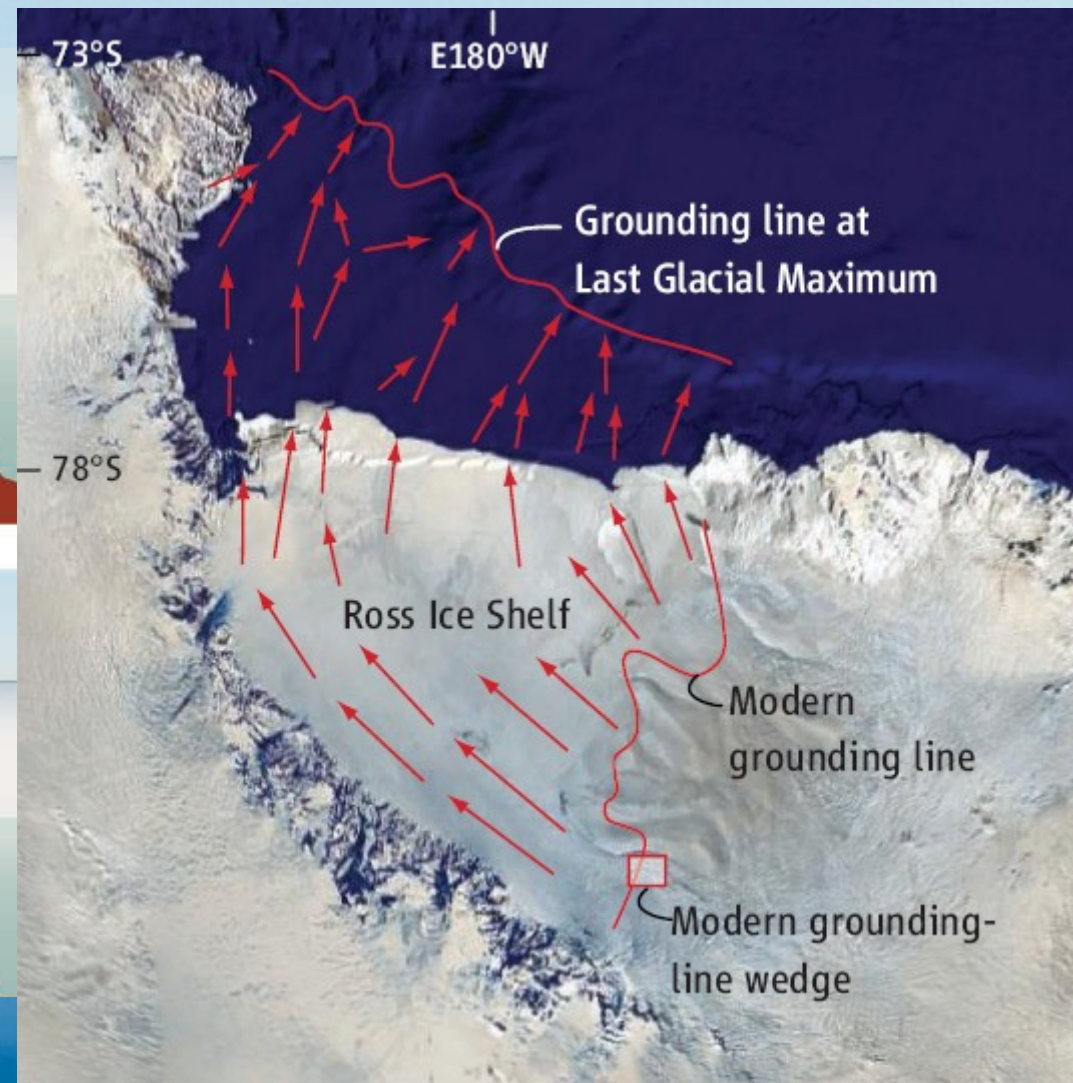
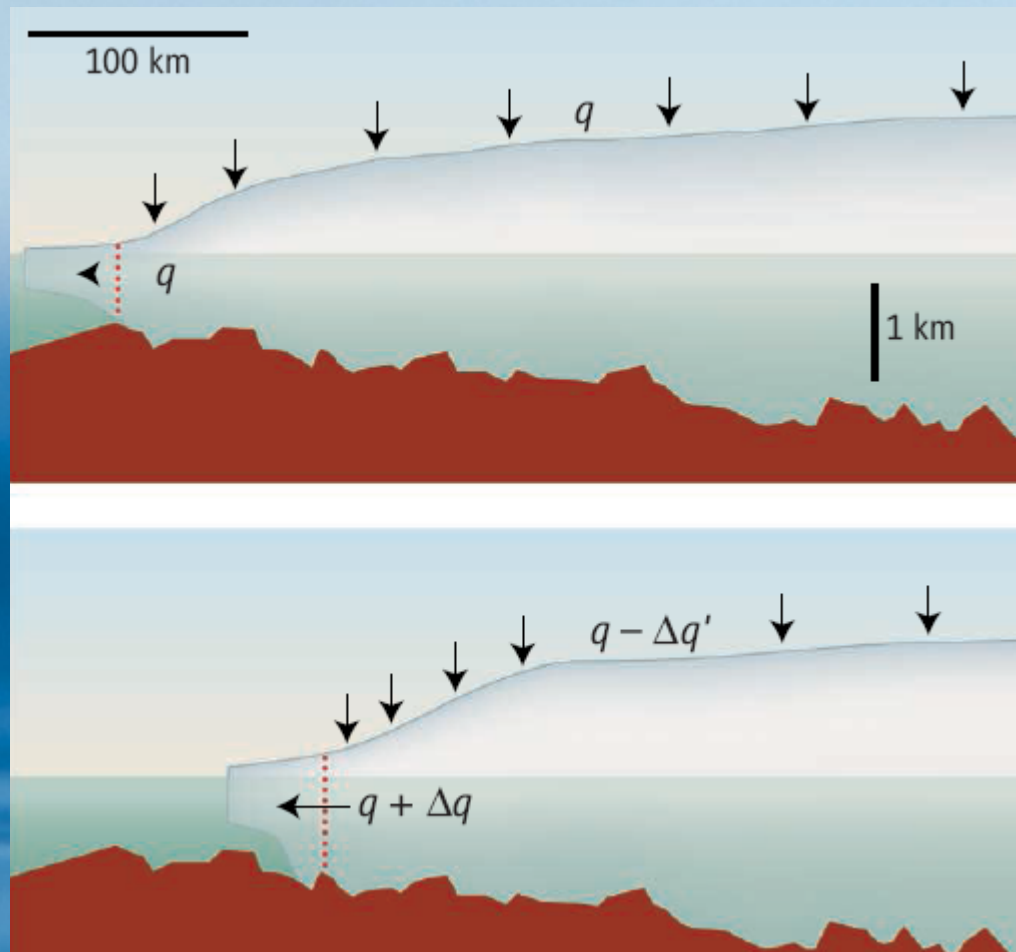
Bariery lodowe cofają się od dawna



Bariera Rossa cofa się przez cały holocen co świadczy o tym, że po zakończeniu epoki lodowej nie była nigdy w równowadze. Zasilana jest czterema strumieniami lodowymi A, B C i D. Strumień C zatrzymał się 130 lat temu.

Oppenheimer 1998 (Nature) & Conway et al. 1999 (Science)

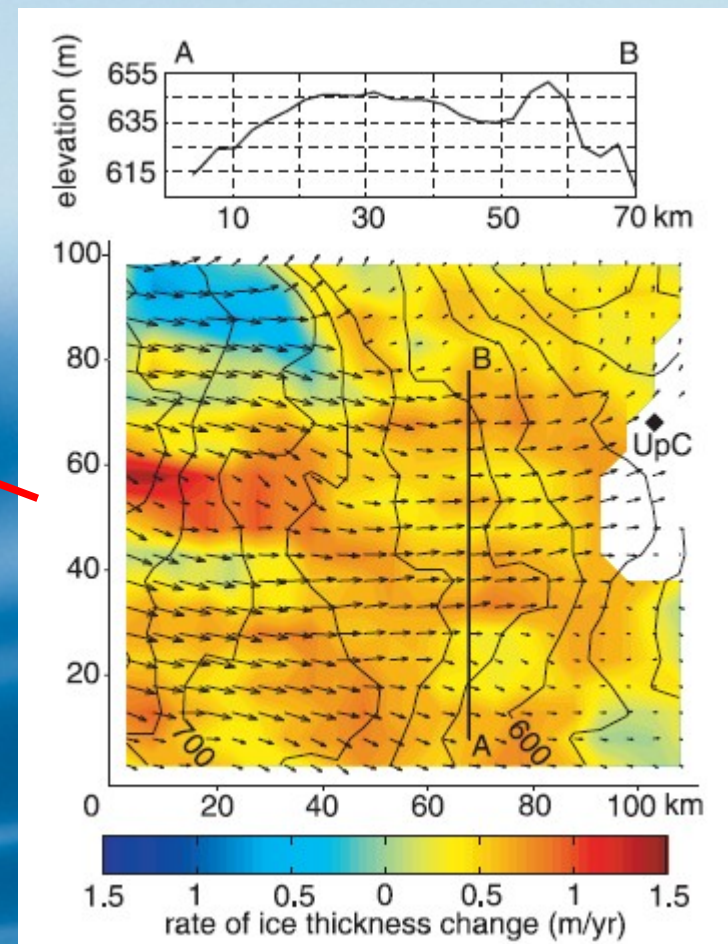
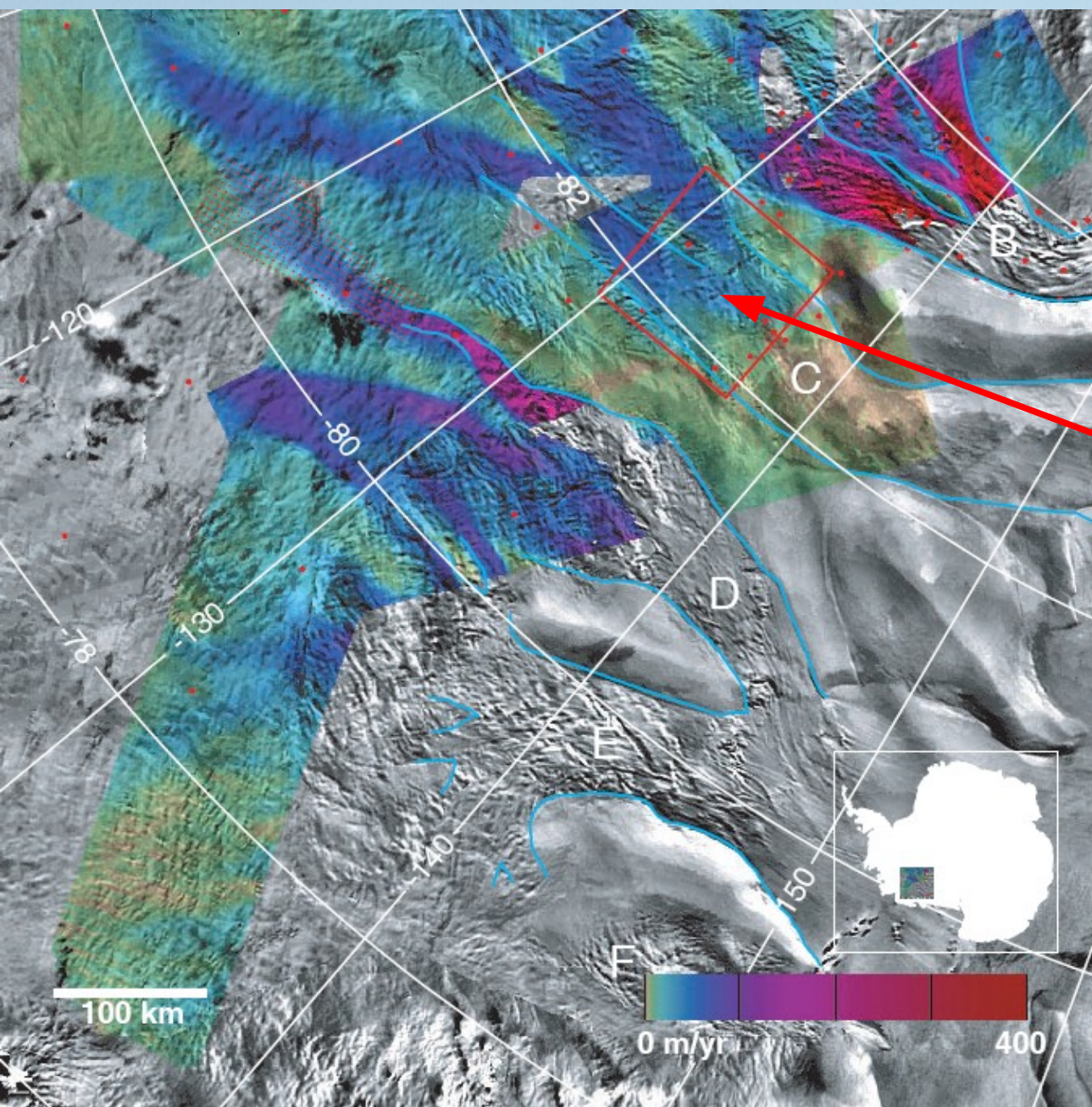
Czy Bariera Rossa jest stabilna?



Istnieją obawy, że podnoszący się poziom morza może “unieść” bariery takie jak Bariera Rossa z klina osadowego na jakim spoczywa *grounding line*. Niedawne badania terenowe dowodzą, że istnienie i wielkość klina oznacza stabilność barier nawet przy kilkumetrowym podniesieniu się poziomowi morza.

Vaughan & Arthern 2007 (Science); Anderson 2007 (Science)

Strumienie lodowe Zachodniej Antarktydy

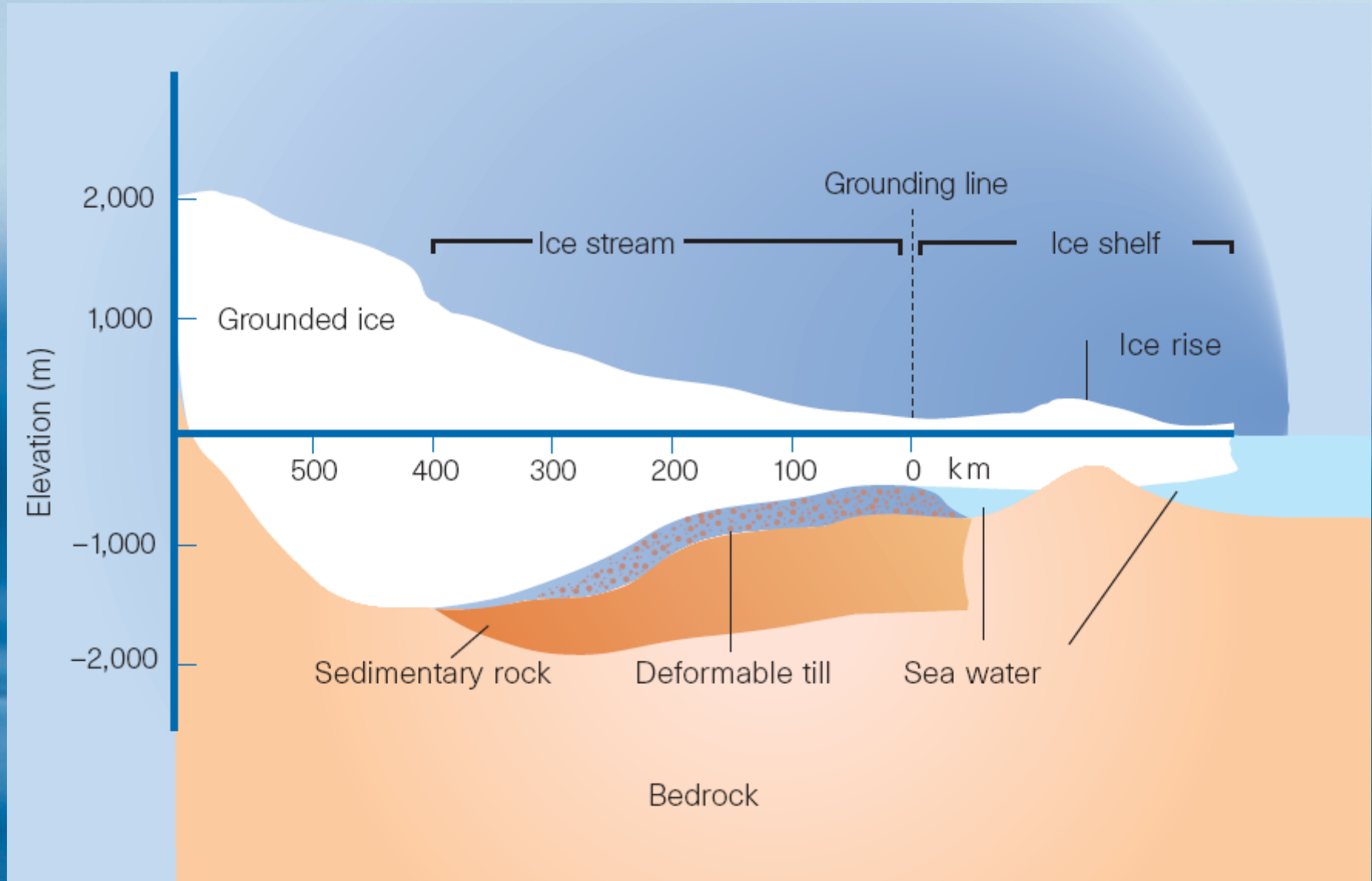


Prędkość przesuwu i zmiany wysokości z danych interferometrii radarowej satelity RADARSAT

Strumienie lodowe WAIS poruszają się do 400 m/rok. "Zatkany" strumień C zaczyna przekazywać swój lód sąsiedniemu strumieniowi B.

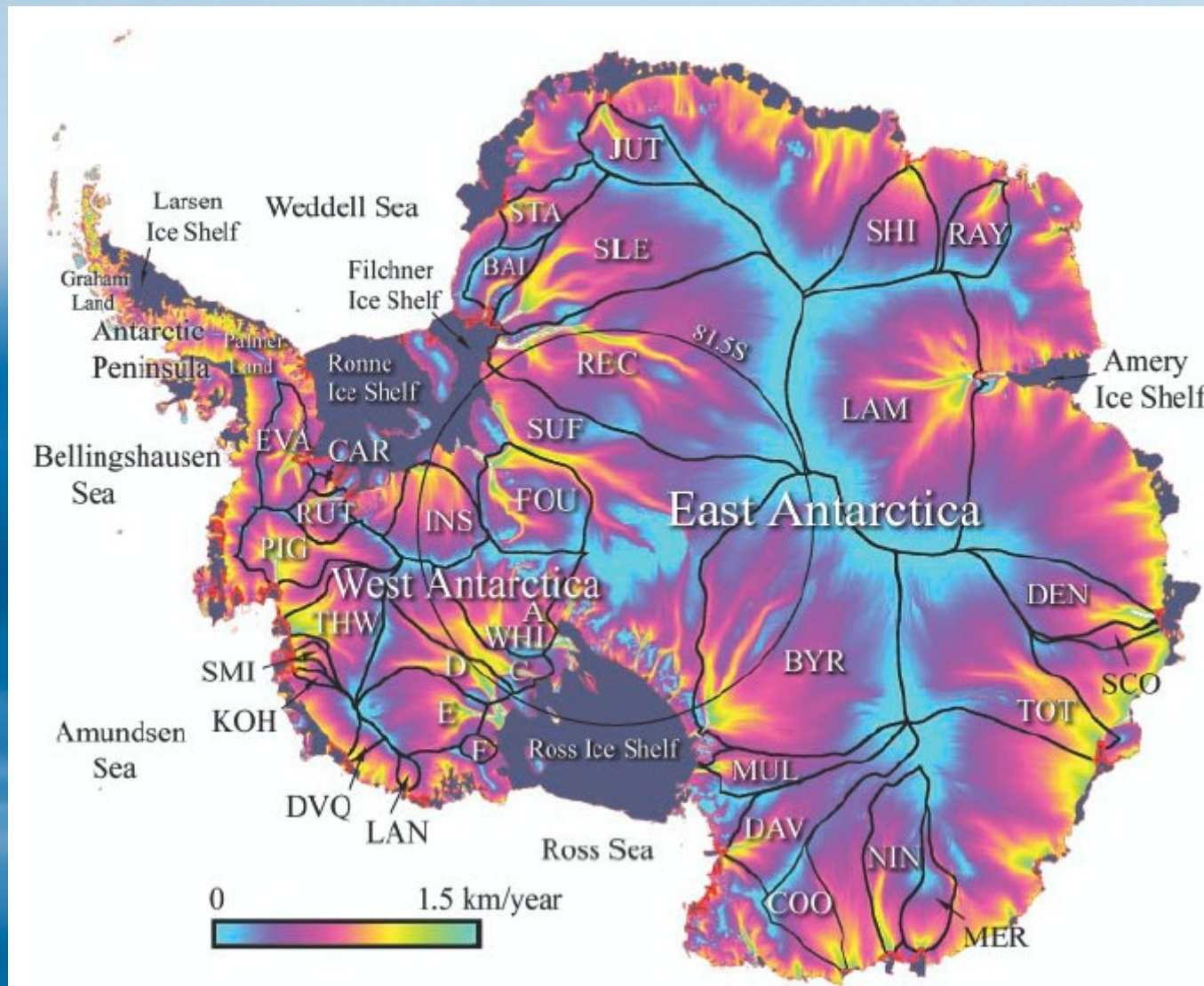
Joughin et al. 1999 (Science)

Na czym jedzie strumień lodowy?



Lodowce (właściwie strumienie lodowe) Zachodniej Antarktydy posuwają się po warstwie osadów oraz wody. Od granicy na której zaczynają unosić się na wodzie (*grounding line*) stają się barierą lodową.

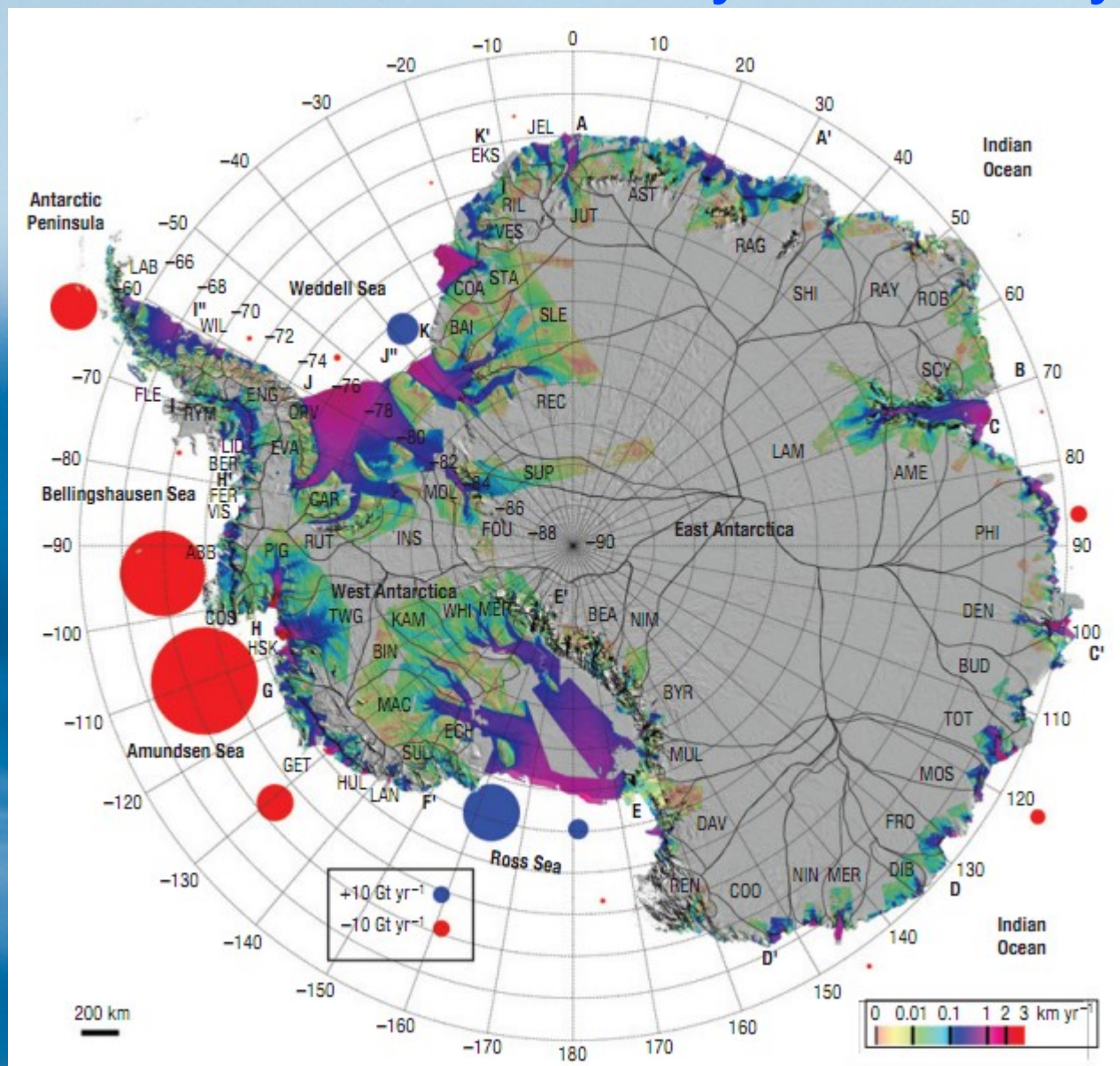
Strumienie lodowe całej Antarktydy



Strumienie lodowe poruszają się nawet z prędkością 1500 m/rok. Próba zbilansowania różnic P-E i strumieni lodowych w 2002 dała wyniki -48 ± 14 km³/rok dla Zachodniej Antarktydy i $+22 \pm 23$ km³/rok dla Wschodniej Antarktydy.

Rignot & Thomas 2002 (Science)

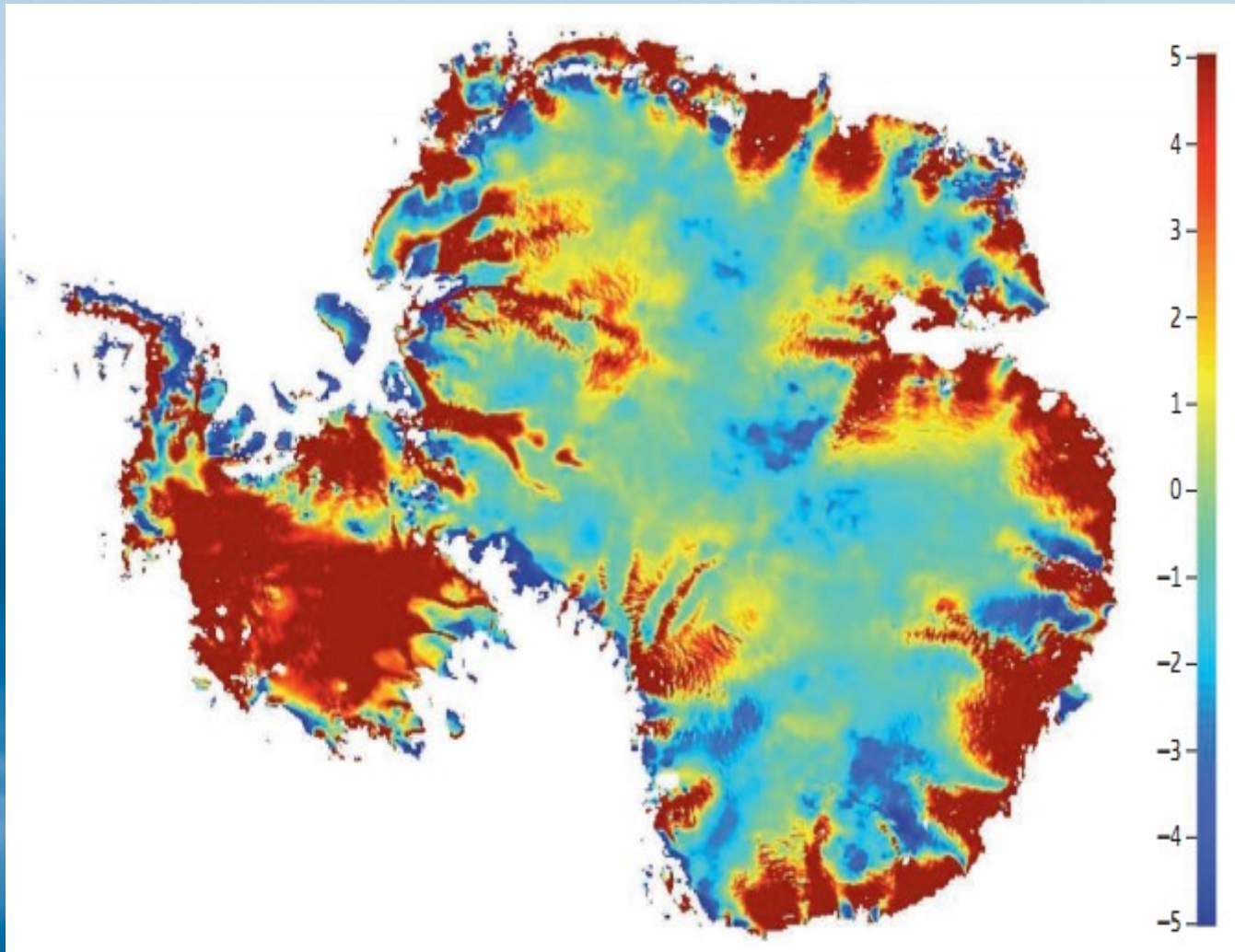
Prędkości strumienie lodowych i zmiany masy



Kolory na lądzie oznaczają prędkość strumieni lodowych w skali logarytmicznej (podkreśla to obszary o szczególnie dużej prędkości), a wielkość kółek oznacza zmiany masy (czerwone to ubytek, niebieskie wzrost).

Rignot et al. 2008 (Nature Geoscience)

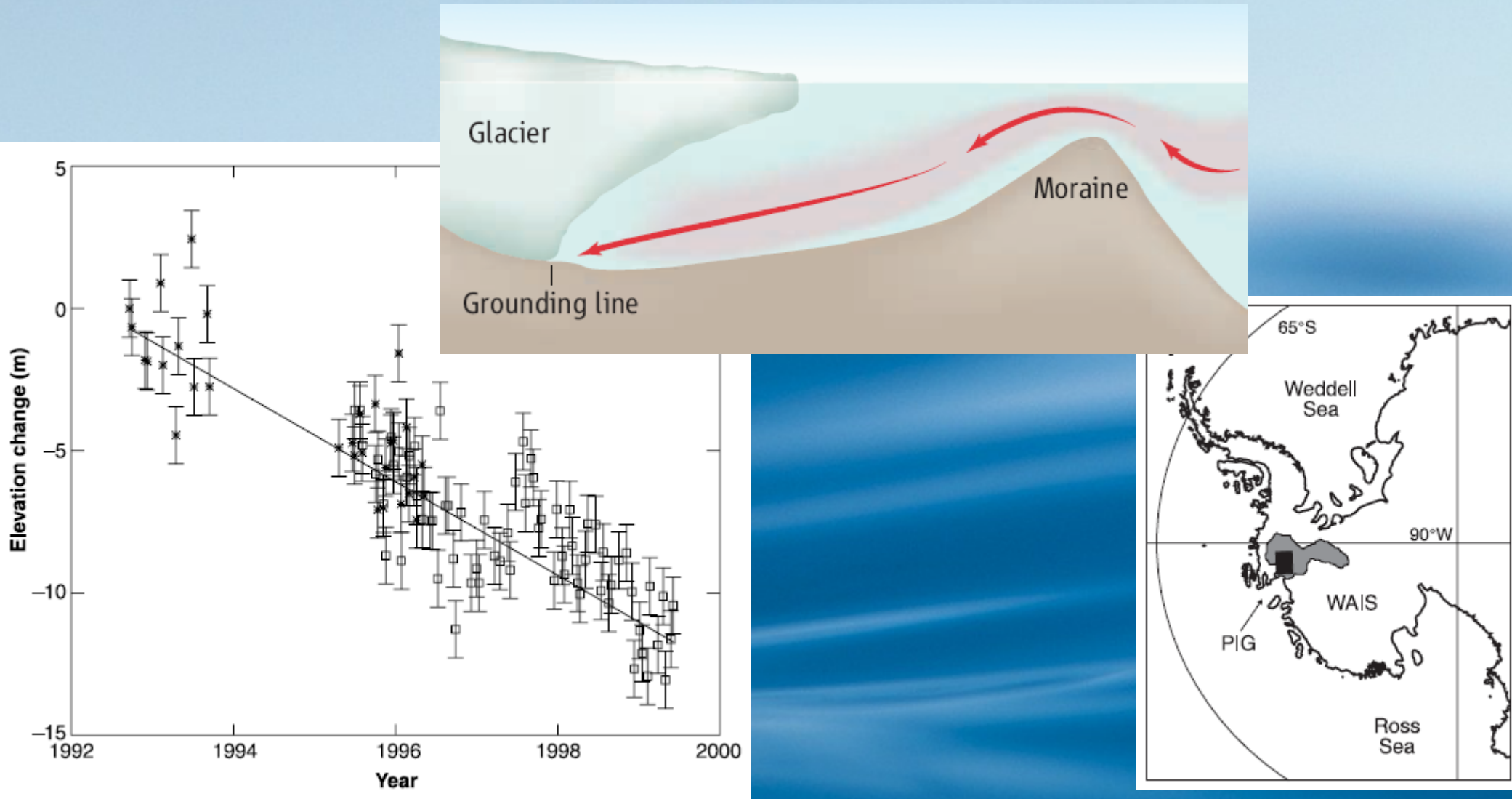
Masy lądolodu może przybywać także od dołu!



Mapa pokazuje ocenę tempa topienia (czerwone i żółte) oraz zamarzania (niebieskie i zielone) lądolodu od spodu. Bell et al 2011 znaleźli we Wschodniej Antarktydzie warstwy takiego lodu pochodzącego z zamarzniętej od spodu wody sięgające grubości 500 m.

Tulaczyk & Hossainzadeh 2011 (Science)

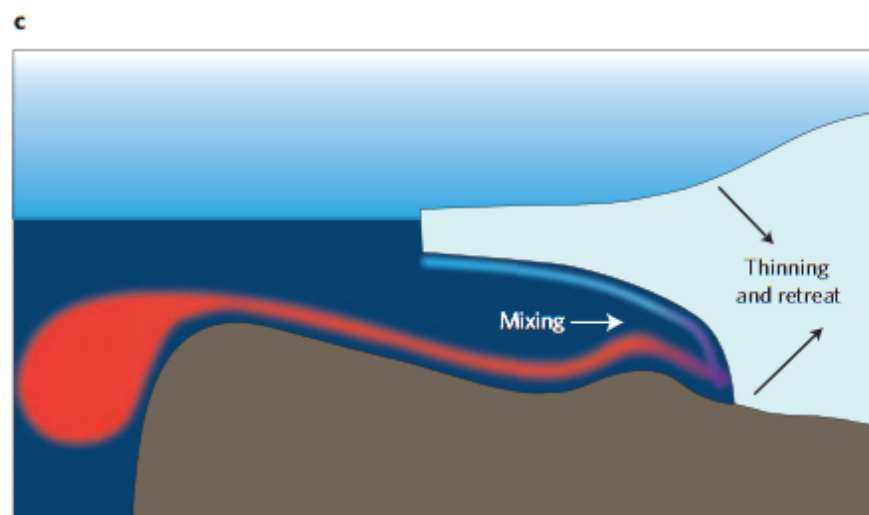
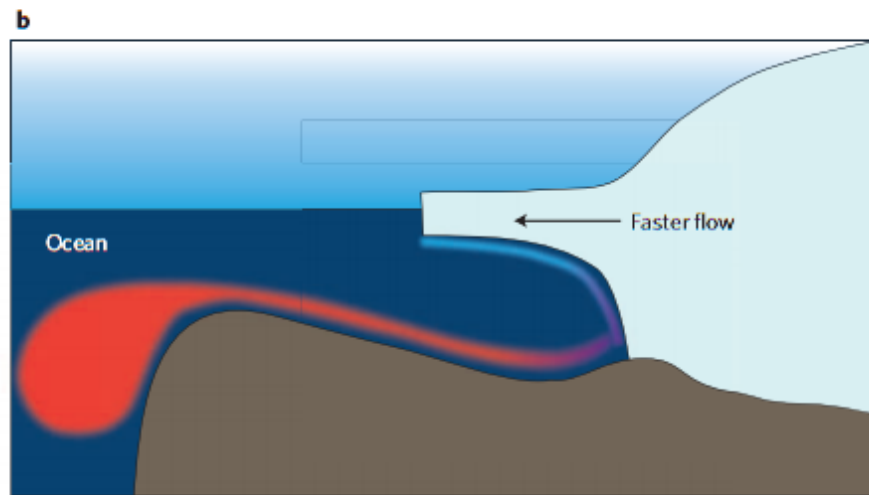
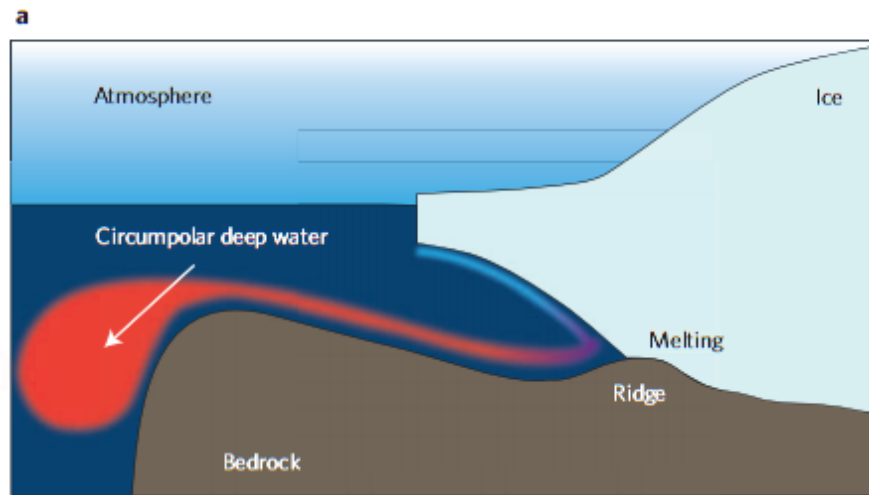
Ocean też może topić lodowce



Ogrzewanie wód pośrednich w oceanie może wpłynąć na przyspieszenie topienia lodowców tam gdzie spoczywają na głębokim dnie (np. lodowiec Pine Island na Antarktydzie) o podstawie ponad 1000 m pod poziomem morza, tracącego 1.5 m rocznie w pobliżu *grounding line*.

Bindschadler 2006 (Science); Shepard et al 2001 (Science)

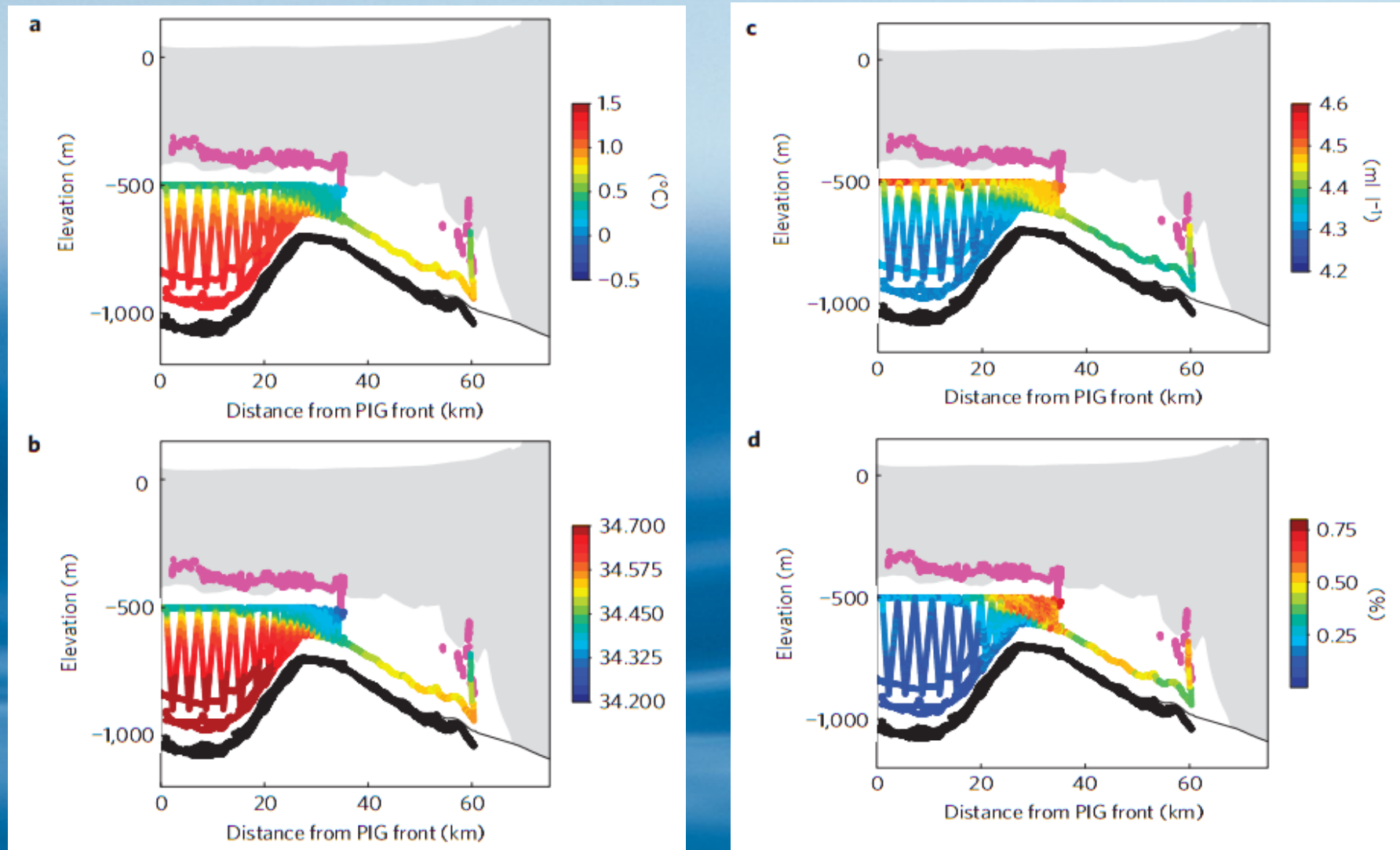
Jak to działa: Pine Island Glacier



W latach 1970ch PIG opierał się na podwodnym grzbiecie (a). Ciepłe wody Prądu Wokółantarktycznego zaczęły wytapiać “jaskinie” (b). Odpływ chłodnych wód z topiącego się lodu zaznaczono na niebiesko. Szybsze topienie powoduje, że lodowiec (*ice stream*) staje się cieńszy i jego front się cofa (c).

I nie jest to tylko teoria...

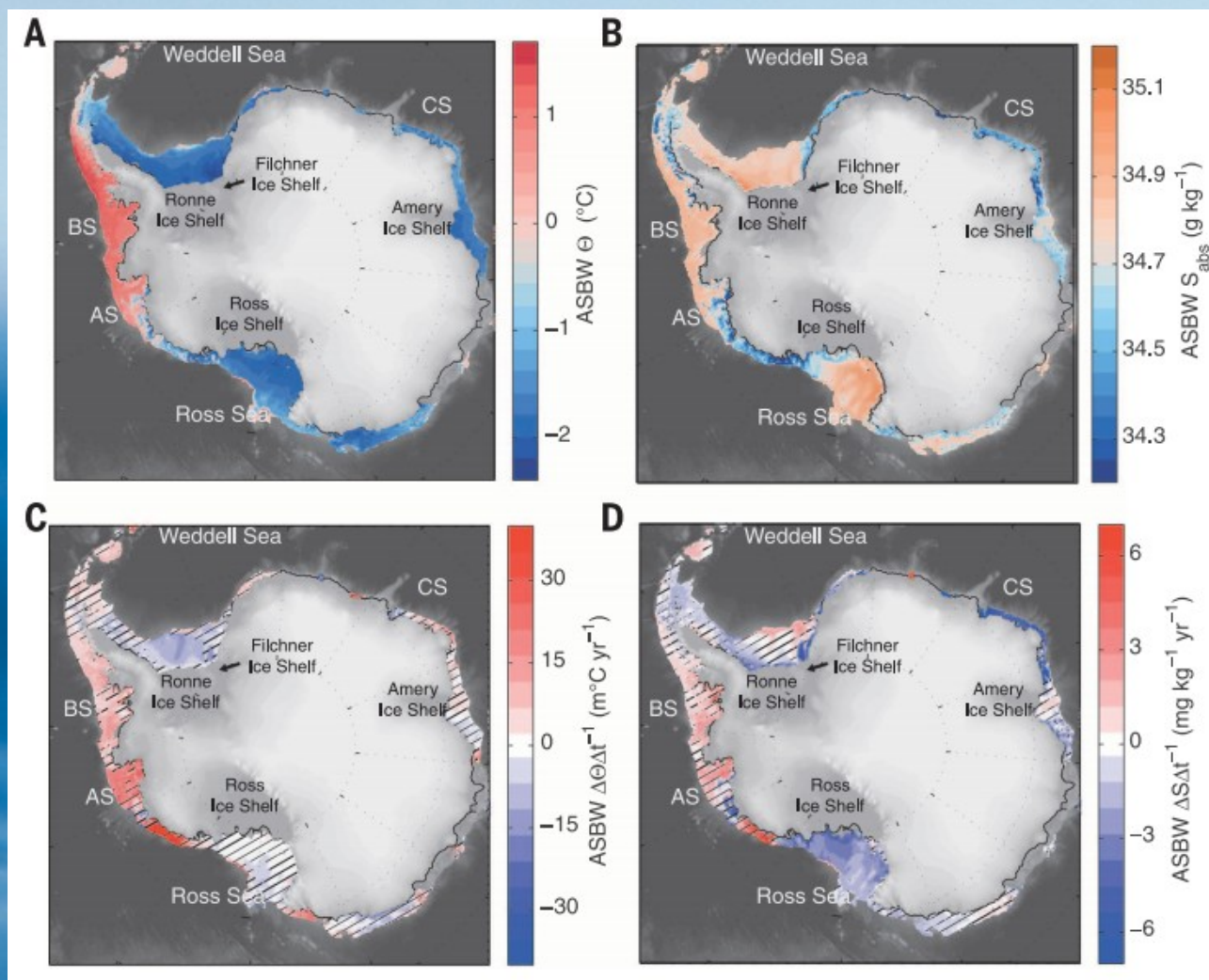
Oceanografia spotyka się z glaciologią



Sondowanie pod lodowcem Pine Island (na rysunkach szary) przy pomocy autonomicznego pojazdu (AUV) pokazały bezpośrednio, że ciepła oceaniczna woda topi go od spodu. Na rysunkach (a) temperatura potencjalna, (b) zasolenie, (c) rozpuszczony tlen i (d) osłabianie światła [pewnie transmitancja]

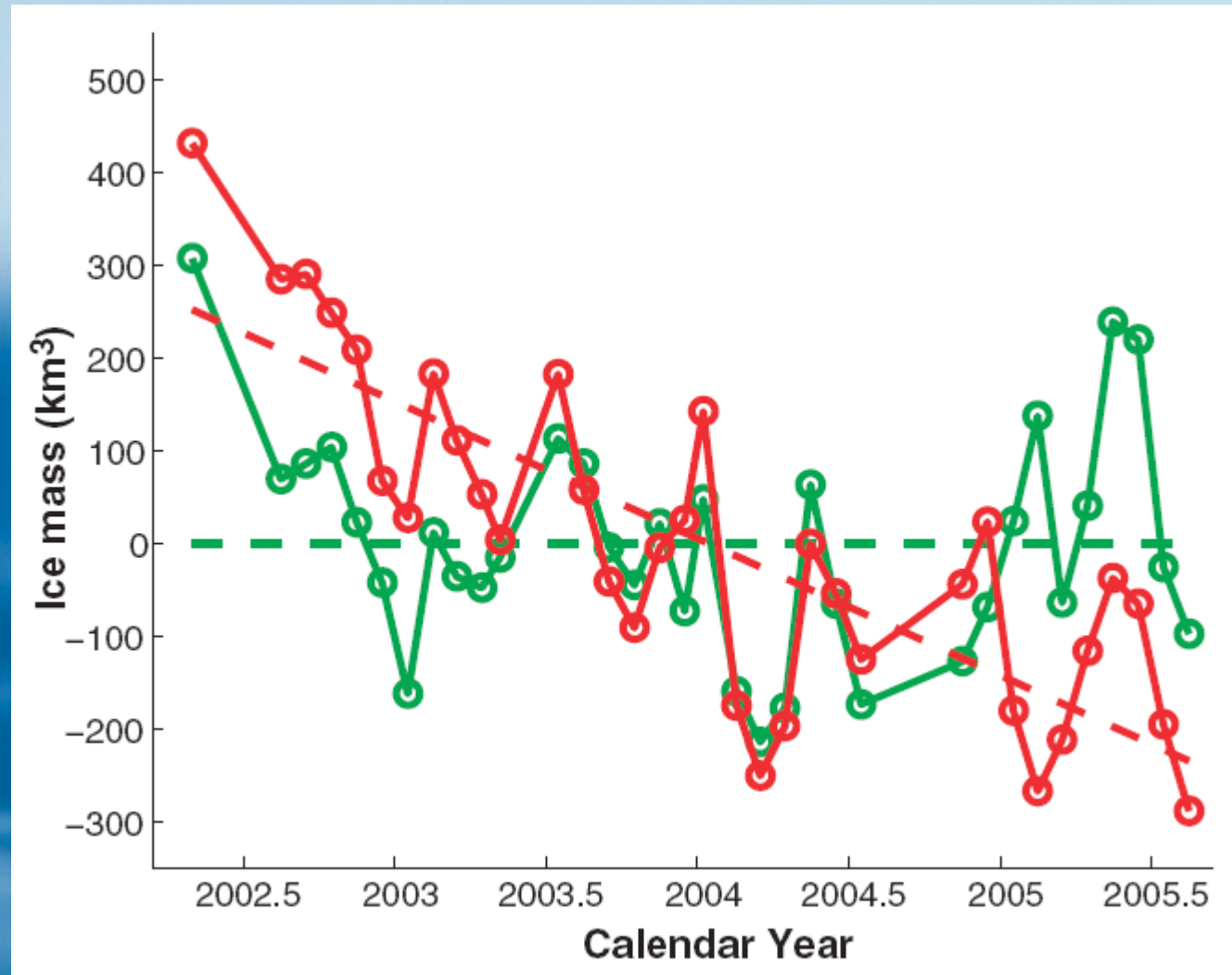
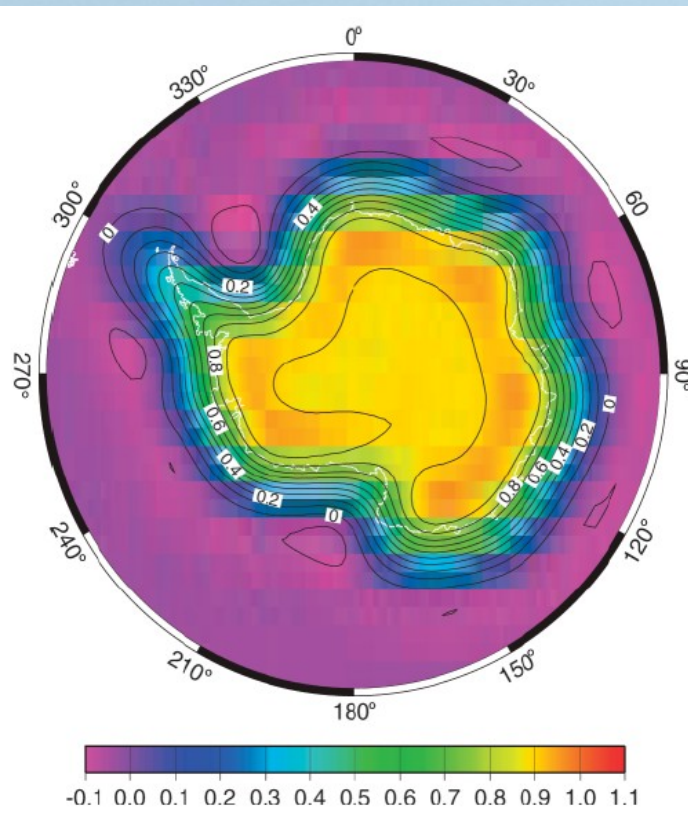
Jenkins et al 2010 (Nature Geoscience)

Zmiany temperatury i zasolenia wód szelfowych



Temperatura (A i C) oraz zasolenie (B i D) głębokich wód szelfowych wokół Antarktydy (Antarctic Continental Shelf Bottom Water (ASBW) w wieloleciu 1975-2012: na górze średnie wartości, a na dole trendy.

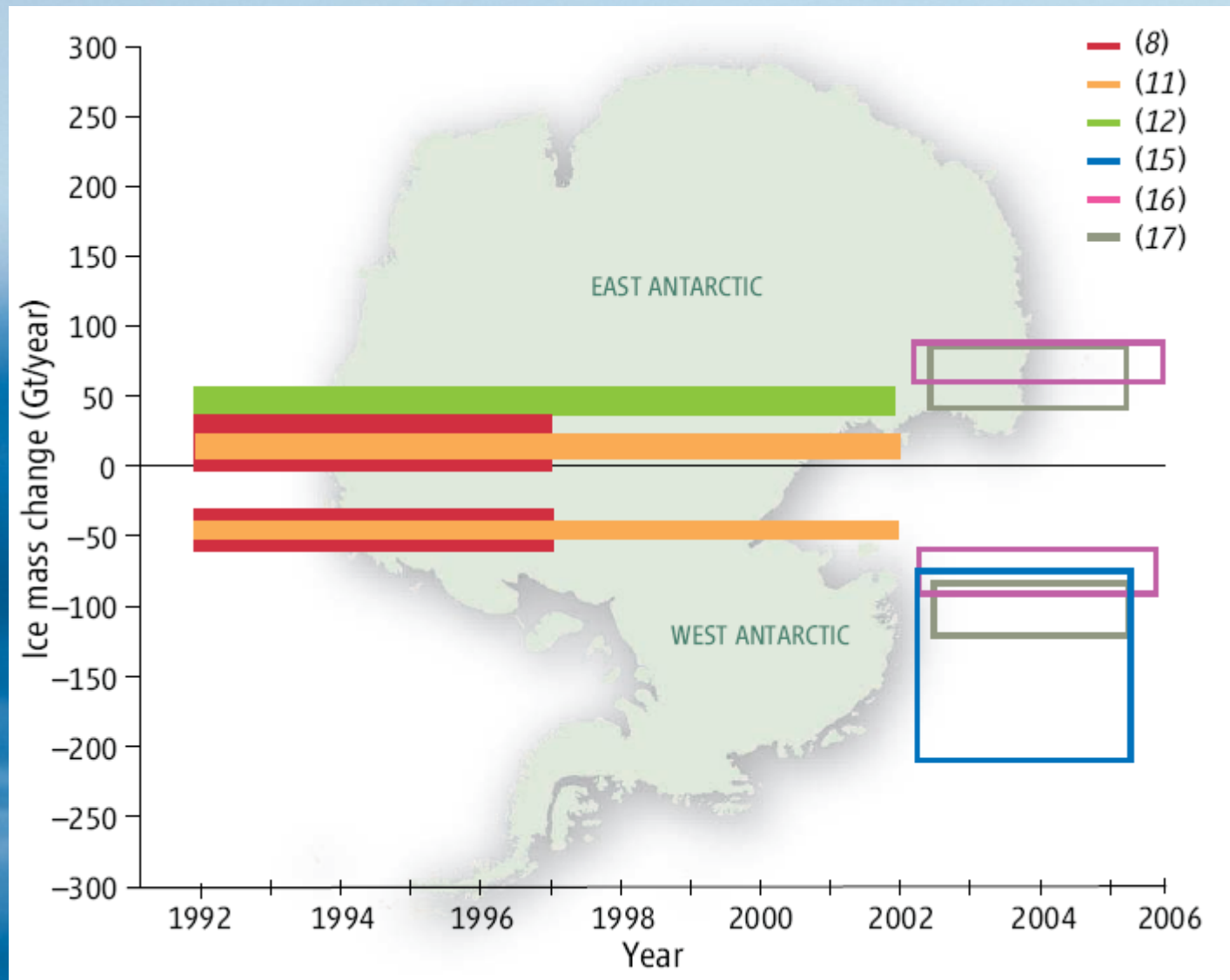
Rozwiązanie z kosmosu: grawitacja



Comiesięczne trzyletnie pomiary grawitacji Antarktydy (zdefiniowanej po lewej) za pomocą satelitów GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) wskazują na większe (i pogłębiające się) ubywanie lodu: $-152 \pm 80 \text{ km}^3/\text{rok}$ co odpowiada $+0.4 \pm 0.2 \text{ mm/rok}$ zmianie poziomu morza (**Wschodnia** $0 \pm 56 \text{ km}^3/\text{rok}$ i **Zachodnia** Antarktyda $-148 \pm 21 \text{ km}^3/\text{rok}$)

Velicogna & Wahr 2006 (Science)

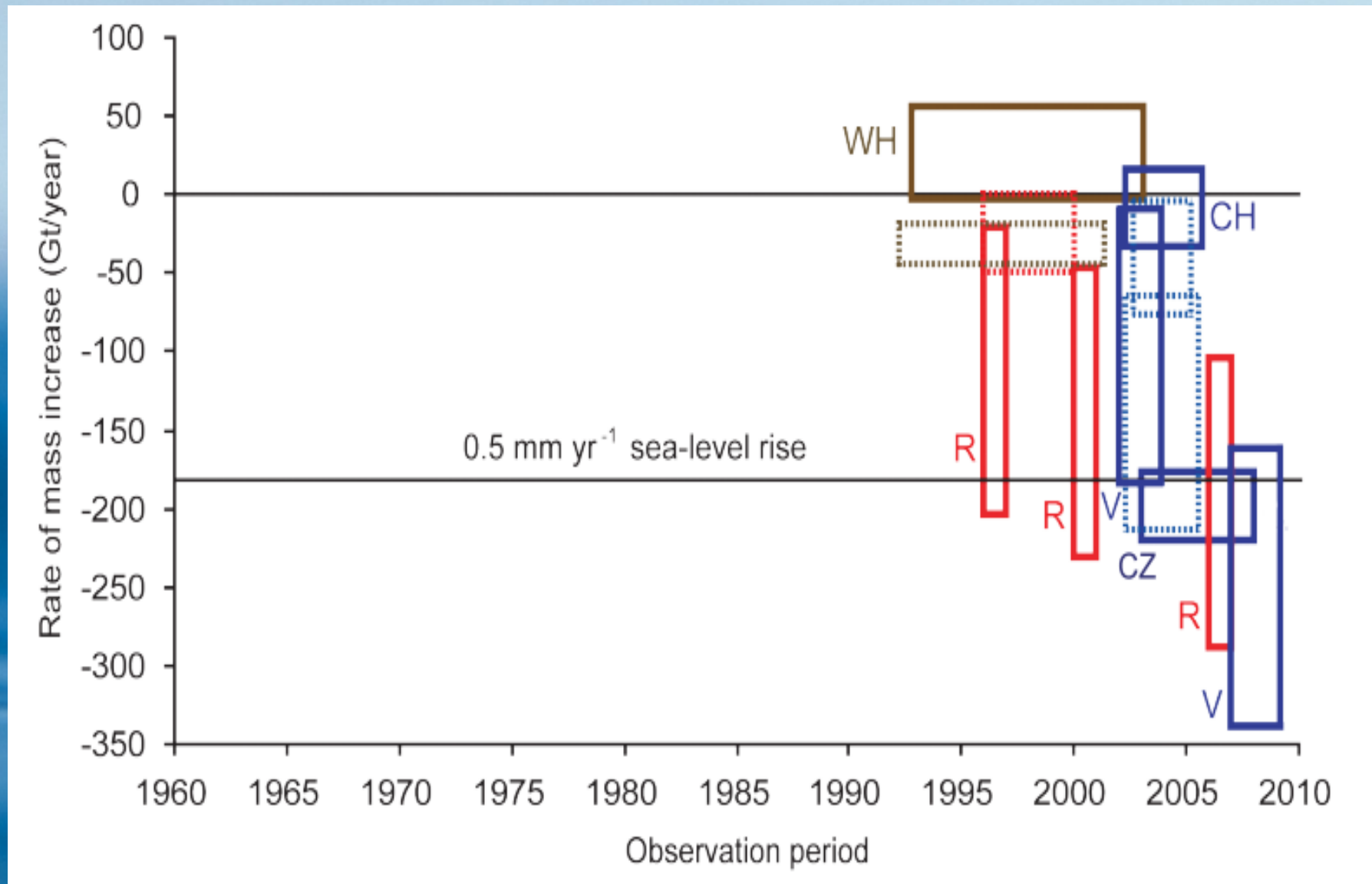
Bilans bilansów



Bilans masy lodu (uwaga osobny!) dla Wschodniej (góra) i Zachodniej (dół) Antarktydy zmienia się na coraz bardziej ujemny (szczególnie Zachodniej). Poprawa metod pomiarowych, zmiana klimatu, czy jedno i drugie?

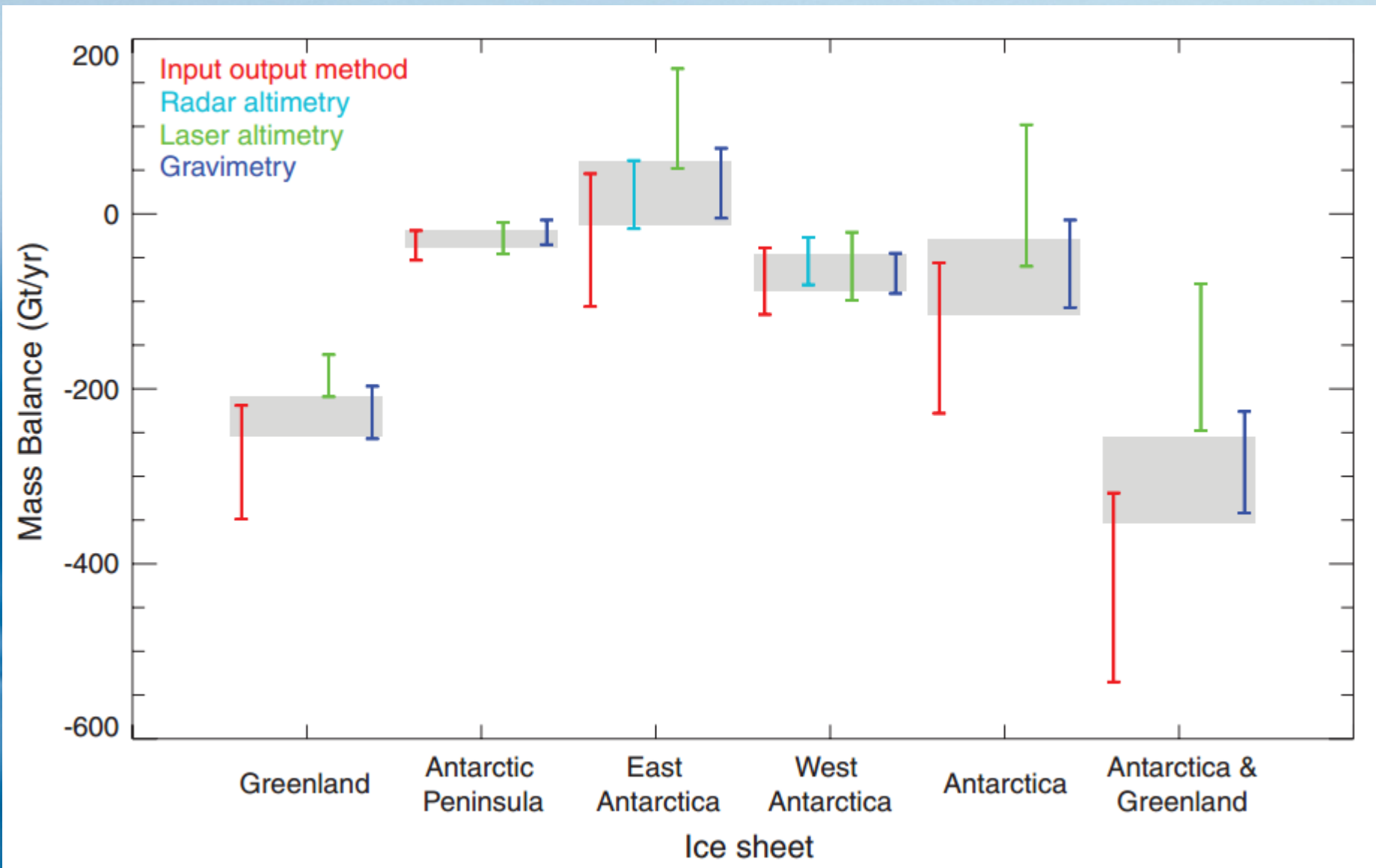
Cazenave 2006 (Science)

Bilans bilansów dla Antarktydy



Bilans masy lodu (w Gt/rok) Antarktydy z kolejnych publikowanych prac zmienia się na coraz bardziej ujemny. Coraz mniej wygląda to na efekt poprawy metod pomiarowych, a coraz bardziej na skutki zmian klimatu.

Ciągle są jednak różnicem metodologiczne



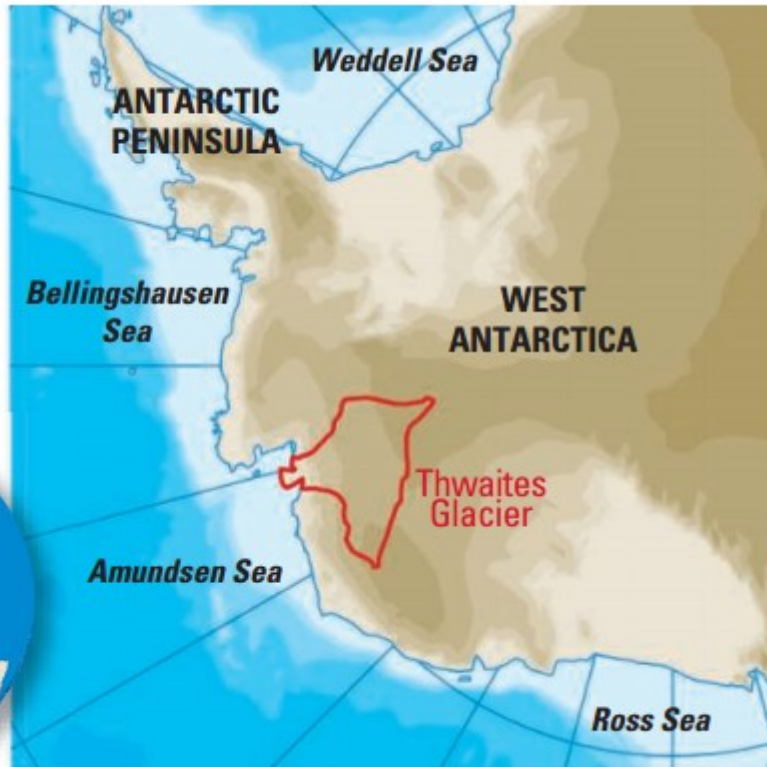
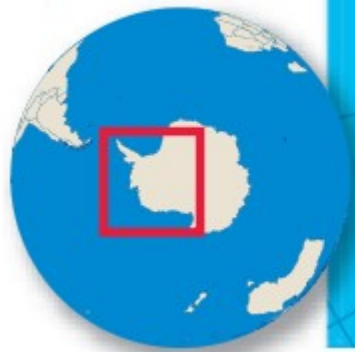
Bilans masy lodu Antarktydy jest ujemny dla wszystkich metod z wyjątkiem altymetrii laserowej (patrz też Zwally et al. 2015). Jednak od 2009 nie mamy nowych danych “laserowych” (taki sensor planowany jest na ICESat2 w 2017 roku).

Shepard et al 2012 (Science)

No Stopping the Collapse of West Antarctic Ice Sheet

Linchpin.

Thwaites Glacier is connected with its neighbors in ways that threaten a wholesale collapse.

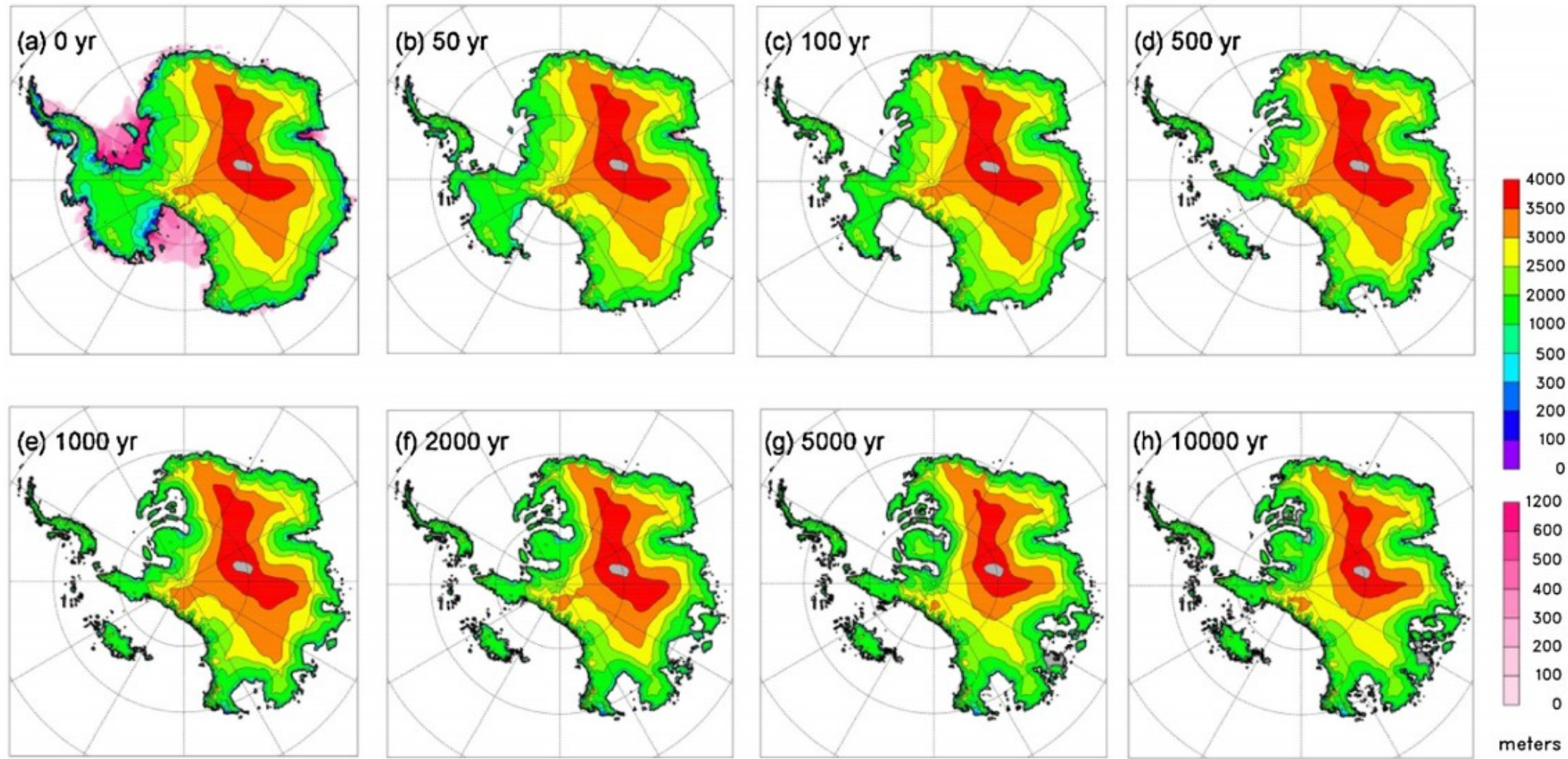


Because inland basins connect Thwaites Glacier to other major glaciers in the region, both research teams say its collapse would flood West Antarctica with seawater, prompting a near-complete loss of ice in the area over hundreds of years. “The next stable state for the West Antarctic Ice Sheet might be no ice sheet at all,” says the *Science* paper’s lead author, glaciologist Ian Joughin of the University of Washington (UW), Seattle.

Linia gdzie Lodowiec Thwaines zaczyna unosić się na wodzie (*grounding line*) zbliża się do progu o głębokości 600 m. Powinna go osiągnąć w ciągu mniej niż 200 lat. Przekroczenie tego progu może spowodować rozpad całego lądolodu Antarktydy Zachodniej.

Sumner 2014 (Science); Joughin et al 2014 (Science)

Rozpad lądolodu Zachodniej Antarktydy może być szybki



Uwzględnienie dwóch nowoodkrytych procesów: kruszenia lądolodu przez wodę roztopową (hydrofracturing) oraz niestabilności klifów lodowych o wysokości ponad 100 m może spowodować bardzo szybki rozpad dużej części lądolodu. W modelu powiększono temperaturę wód wokół Antarktydy o 2 C.

Pollard, DeConto & Alley 2015 (Earth and Planetary Science Letters)

Wkład Antarktydy w przyszły wzrost poziomu morza

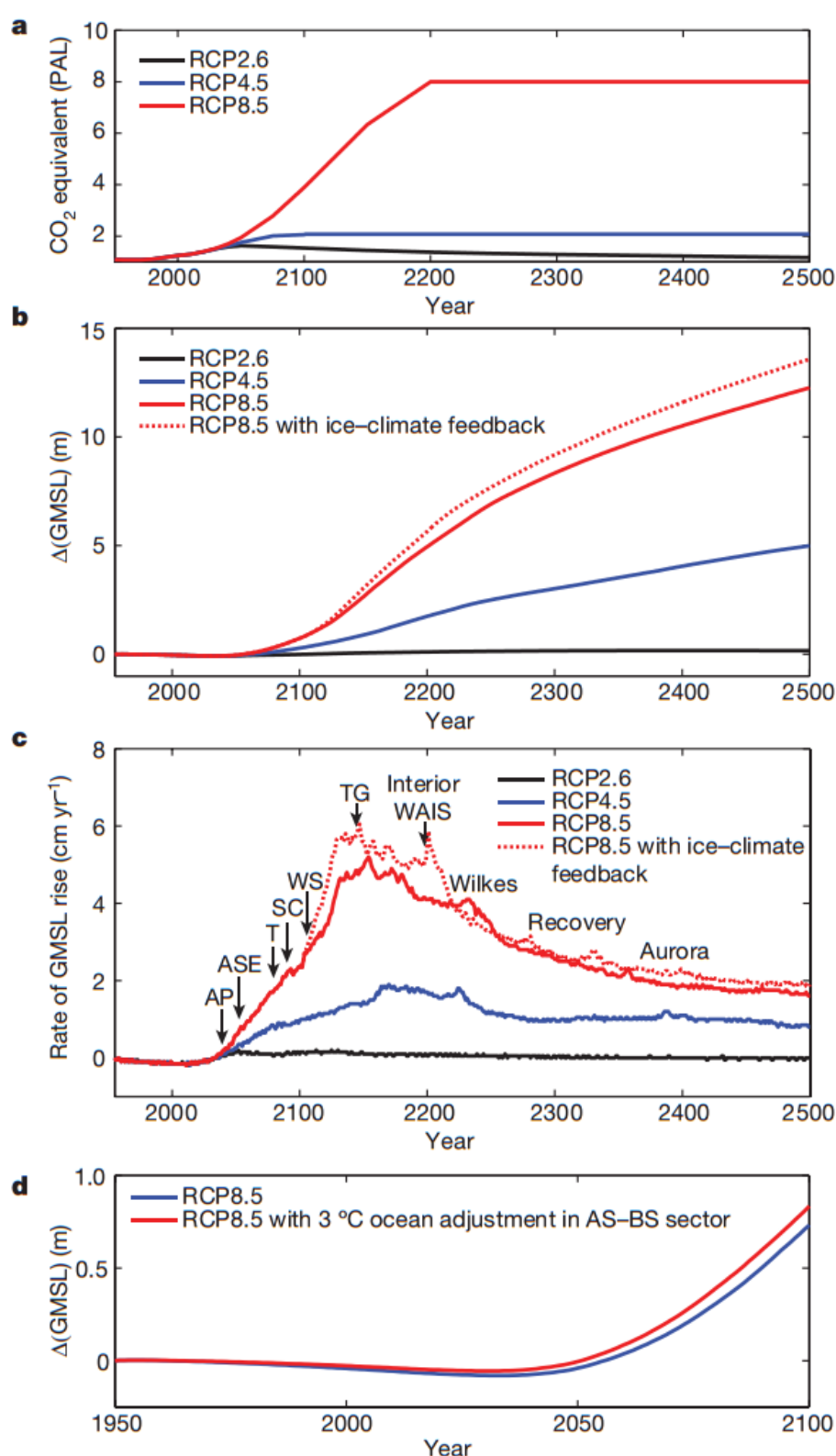
Wyniki modelowania rozpadu lądolodu Antarktydy, uwzględniającego nowe procesy fizyczne:

a. Skumulowane emisje (PAL = poziom obecny)

b. zmiana globalnego poziomu morza

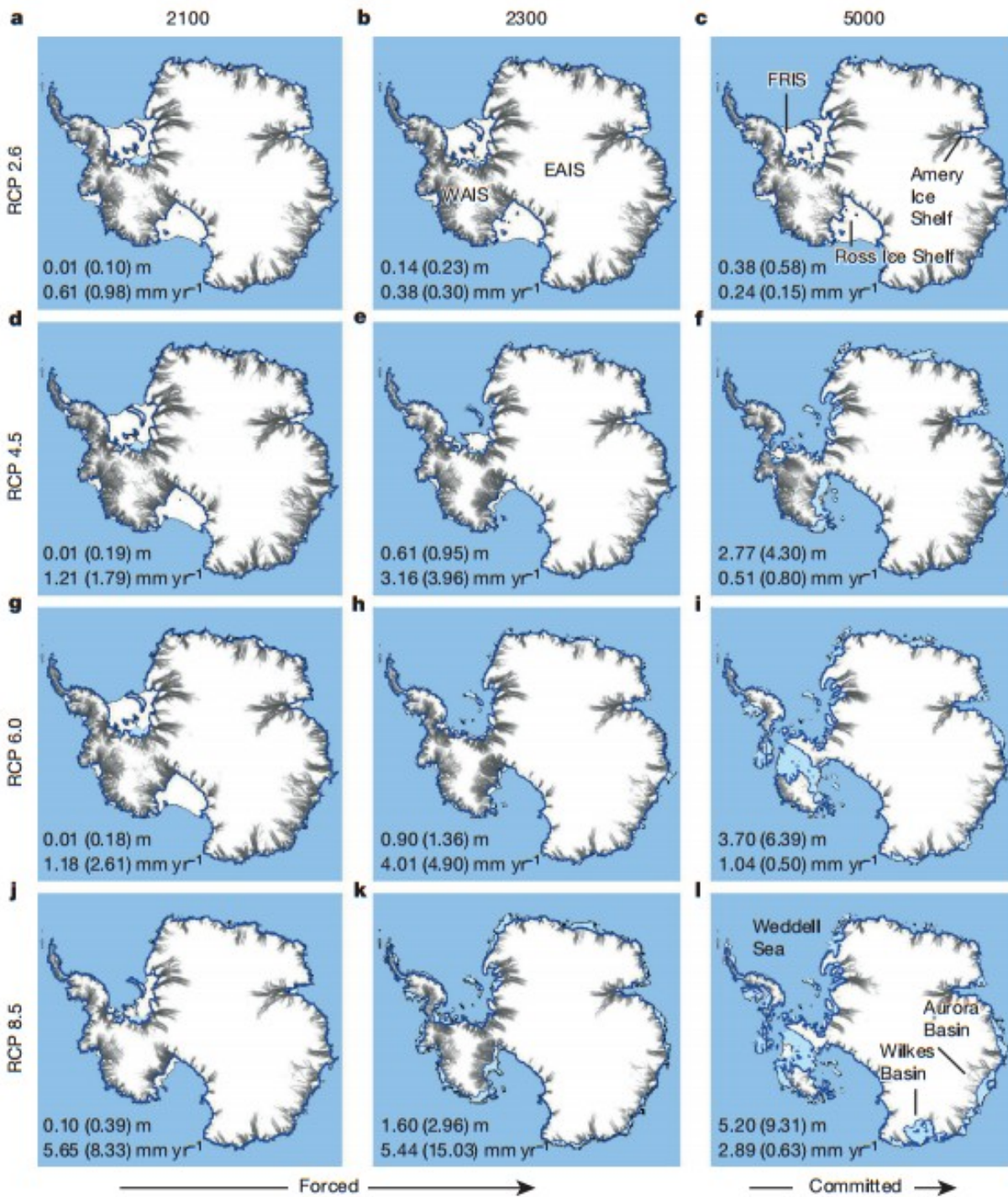
c. tempo wzrastania poziomu morza (zaznaczone rejony lądolodu podlegające rozpadowi)

d. przyczynek Antarktydy do globalnego poziomu morza dla RCP8.5 w dwóch wariantach (z podwyższoną temperaturą oceanu i bez)



Cytat: “The Larsen C is one of the first shelves to be lost, about 2055.”

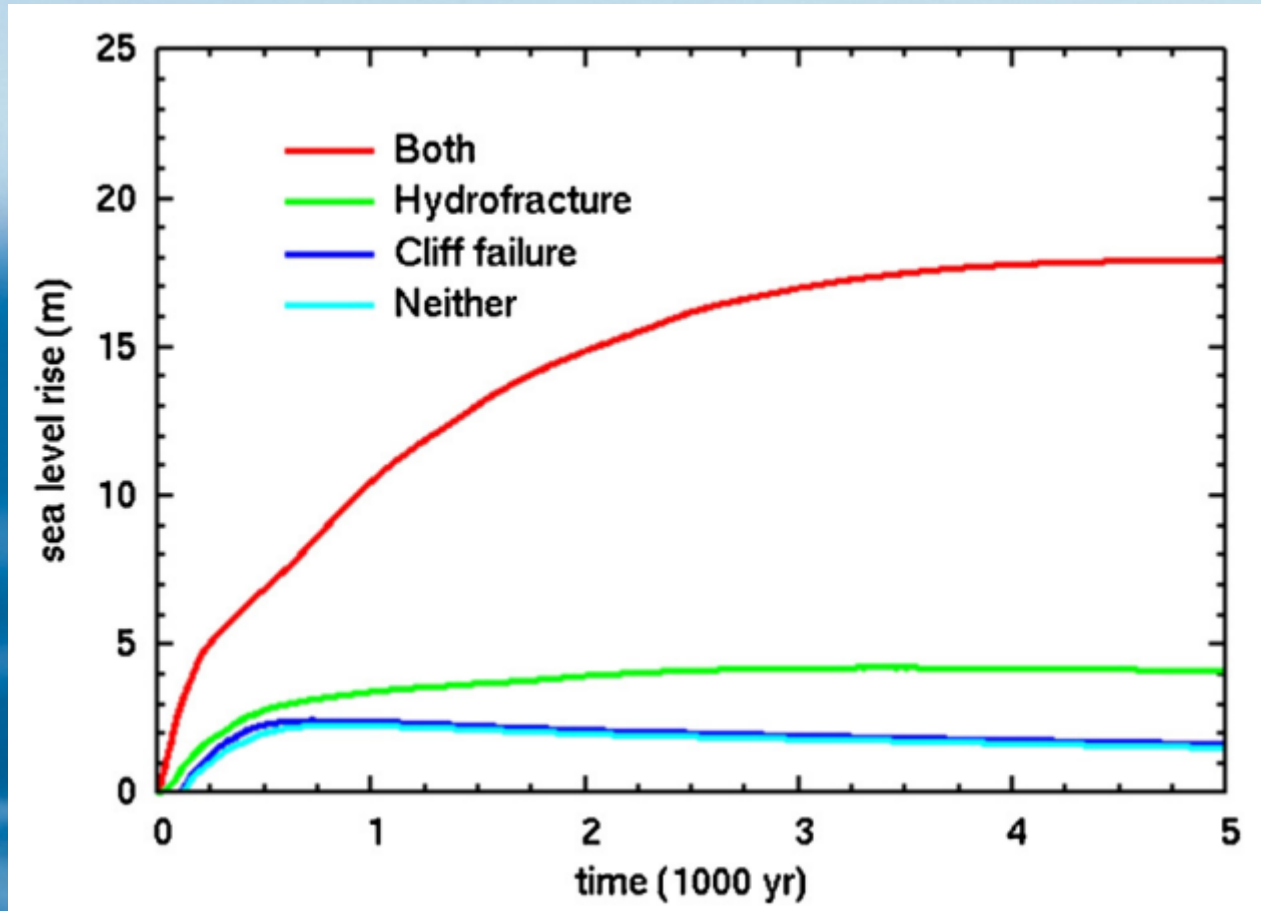
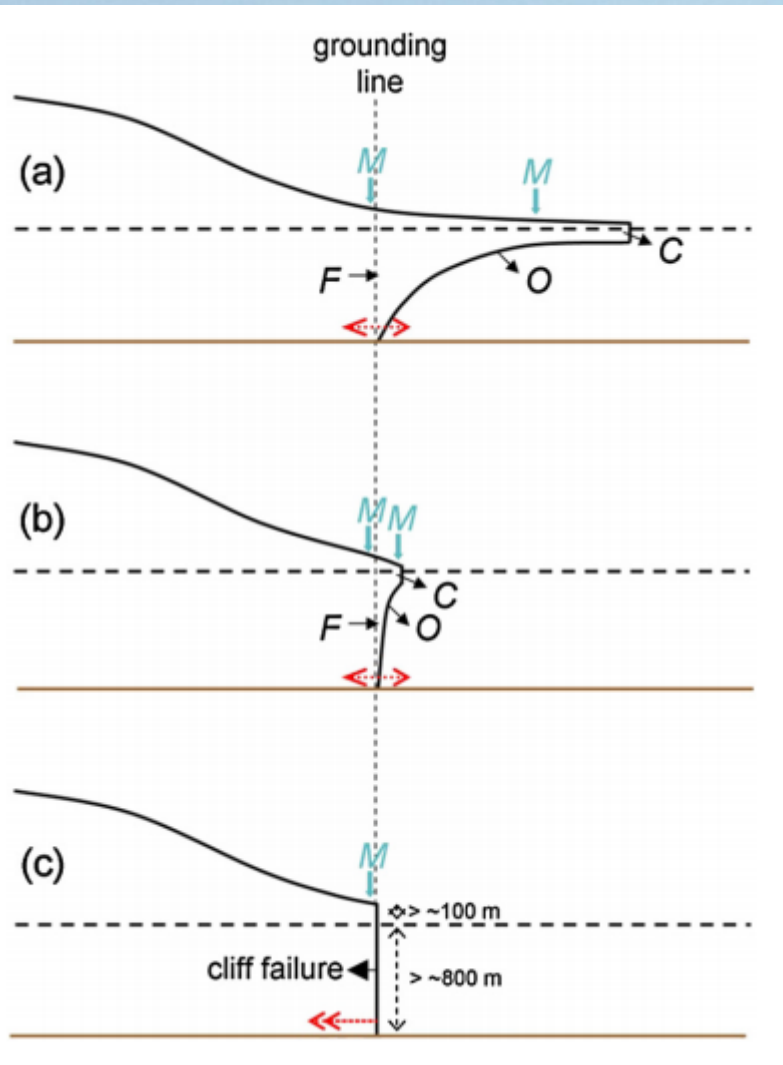
Jak Antarktyda przyczyni się do wzrostu poziomu morza?



Wyniki modelowania
wyglądu lądolodu
Antarktydy (oraz tempa
wzrostu i całkowitego
podwyższenia poziomu
morza) dla różnych
scenariuszy emisji i dla
trzech dat (AD 2100,
2300 i 5000). Przy czym,
co ważne, emisje gazów
cieplarnianych kończą
się w 2300 roku.

Golledge et al. 2015 (Nature)

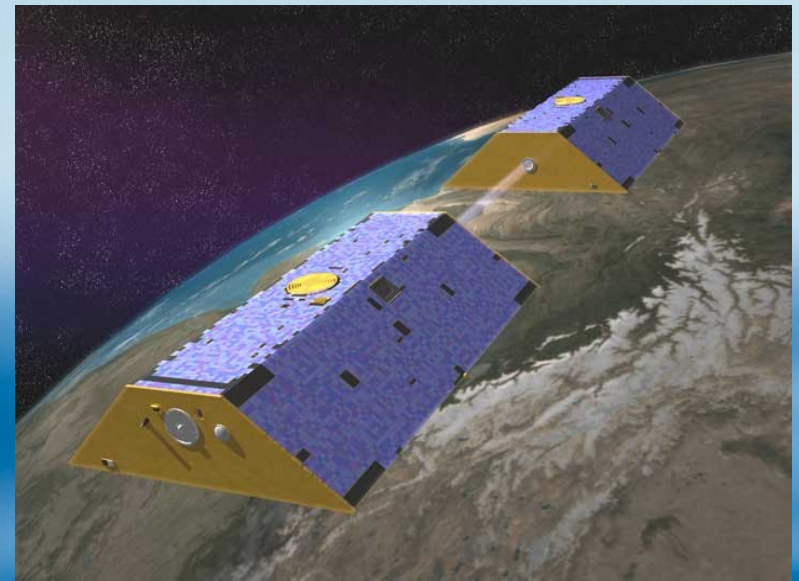
Rozpad lądolodu Zachodniej Antarktydy może być szybki



Mechanizm gwałtownego cofania się klifu lodowego po dojściu czoła lodowca do miejsca gdzie nad wodą jest 100 m (a pod 800 m) oraz wzrost globalnego poziomu morza w modelu przedstawionym w poprzednim slajdzie.

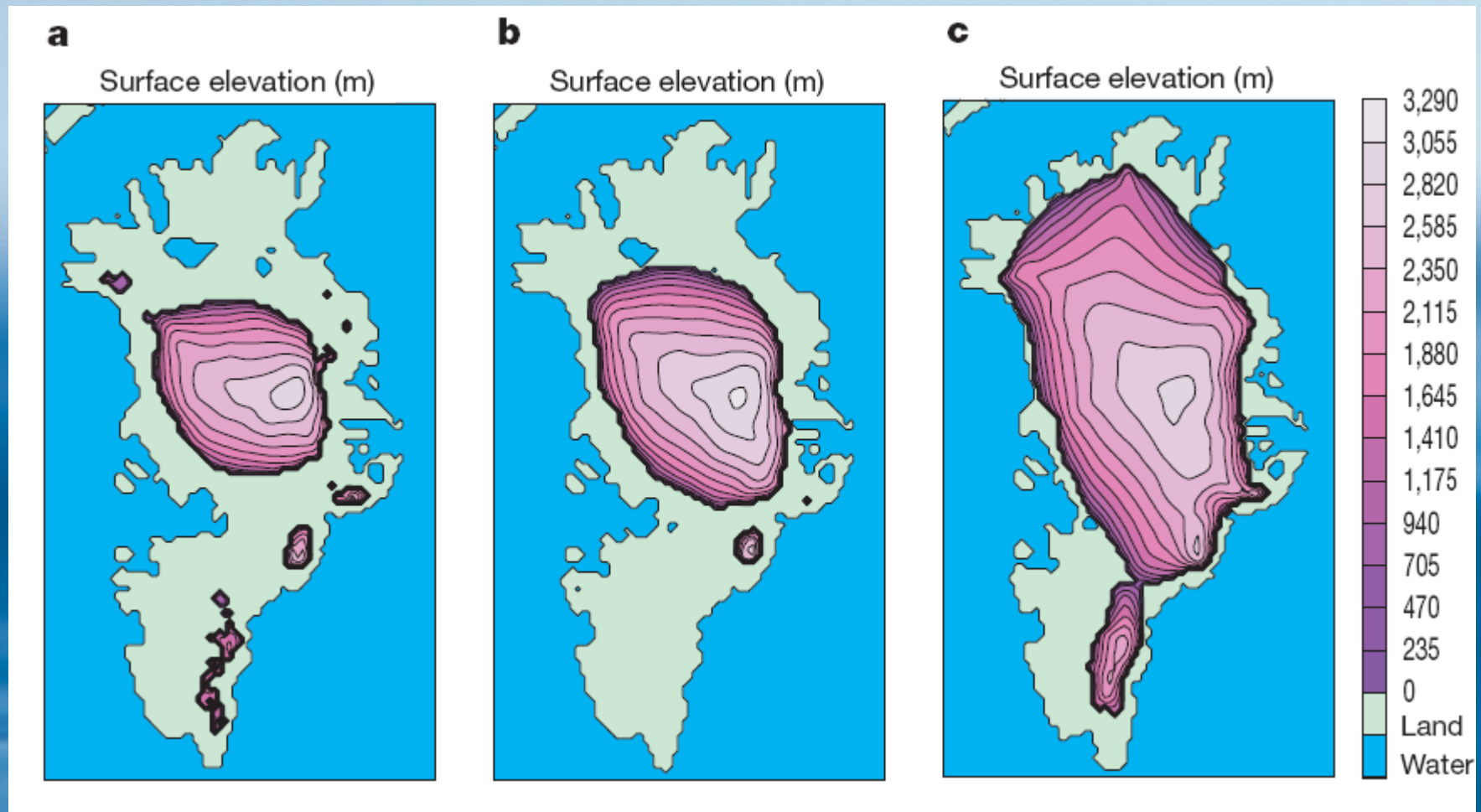
Podsumowanie 1/3

- Półwysep Antarktyczny należy do najszybciej ocieplających się miejsc Ziemi. Powoduje to rozpad części barier lodowych i wtórnie wzrost prędkości lodowców.
- Zachodnia Antarktyda, której lądolód ma podstawę w większości poniżej poziomu morza była co najmniej raz w ostatnim milionie lat pozbawiona lodu. Całkowite jej stopienie oznacza wzrost poziomu oceanów o ponad 3 m.
- Wschodnia Antarktyda wydaje się stabilna. Nie jest nawet pewne czy jej temperatura wzrasta czy się ochładza.
- Nie potwierdza się jednak hipoteza o przyrastaniu masy Wschodniej Antarktydy pod wpływem zwiększonych opadów śniegu.
- Bilans masy Antarktydy wykonany metodą grawitacyjną wskazuje na równowagę masy Wschodniej i ubytek masy Zachodniej Antarktydy (równoważny już ponad 0.5 mm/rok poziomu oceanu i szybko rosnący)



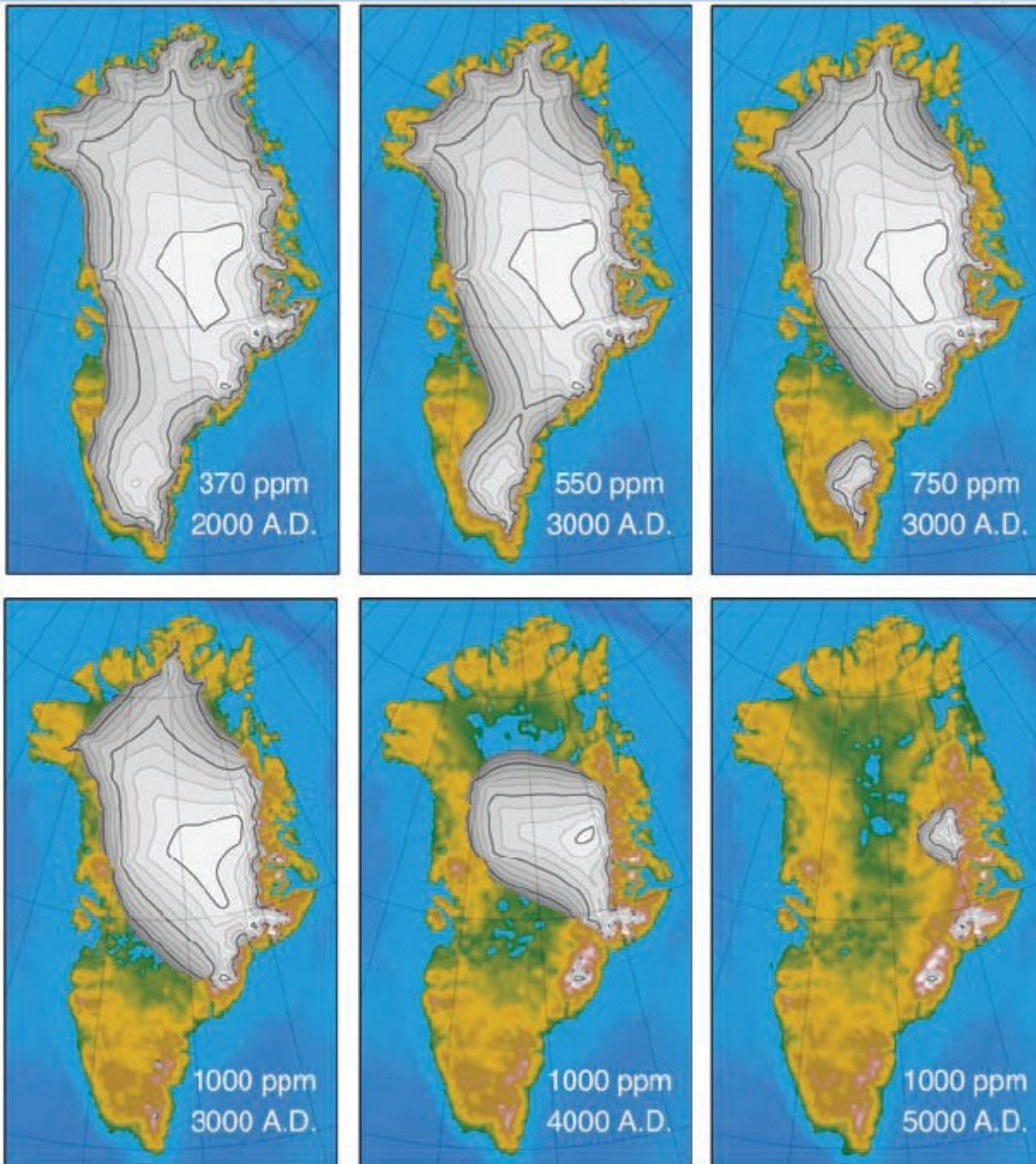
Projekt GRACE: dwa satelity (amerykański i niemiecki) mierzące dokładnie odległość między sobą

Grenlandia podczas poprzedniego interglacjału...



Całkowite stopienie lądolodu Grenlandii podwyższyłoby poziom oceanu o ok. 7 m. Podczas poprzedniego interglacjału (ok. 120 ka) gdy poziom morza był o 7 m wyższy niż obecnie, przyczynek od Grenlandia wynosił prawdopodobnie od 4 do 5 m. Na rysunku różne warianty modelowania Grenlandii z tego okresu (najbardziej prawdopodobny jest wariant między b oraz c).

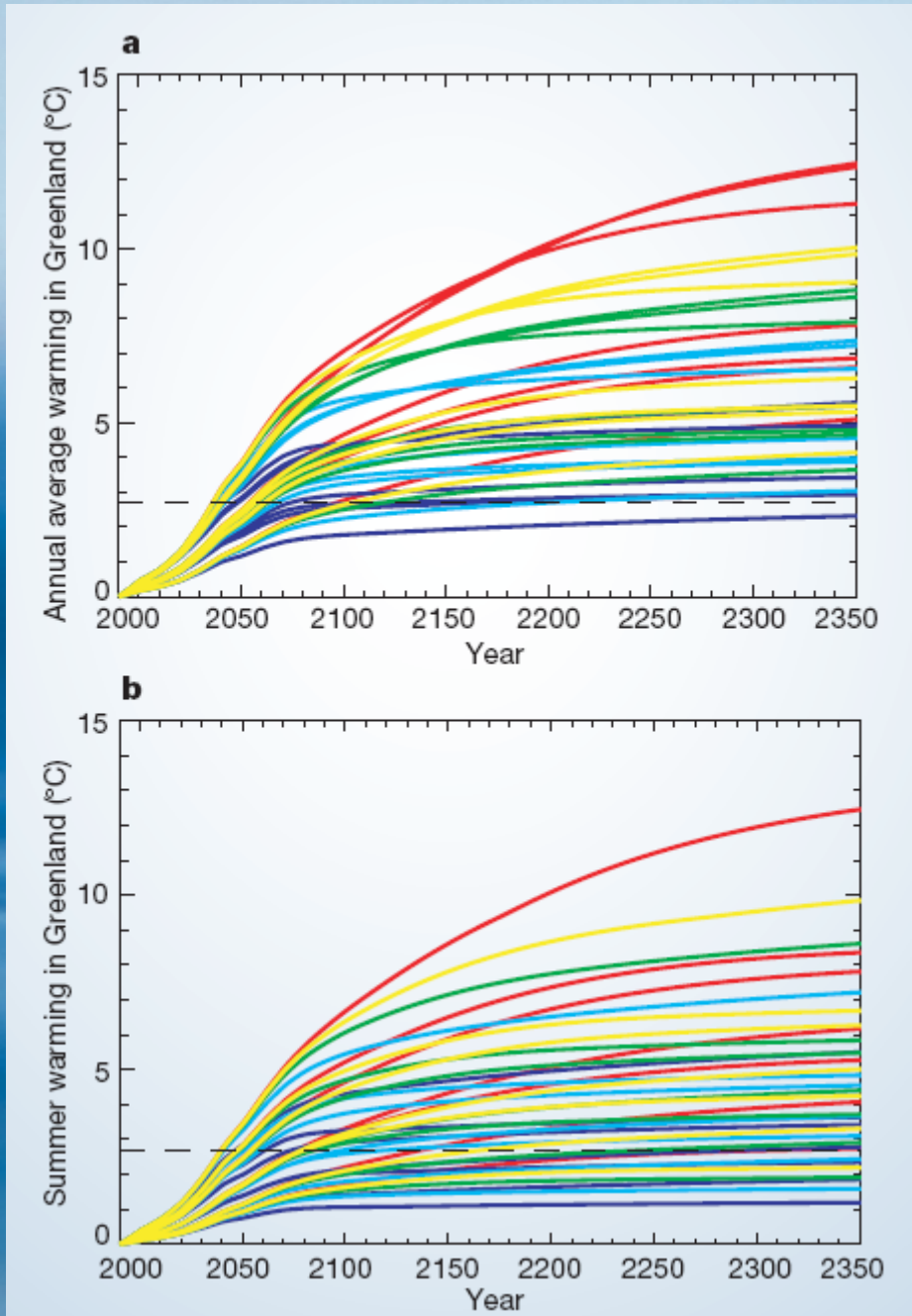
... i w przyszłości



Grenlandia dziś i wyniki modelowania jej przyszłego stanu w funkcji koncentracji CO₂ i roku.

Lód Grenlandii nie odtworzy się nawet gdyby klimat powrócił do stanu dzisiejszego – lądolód wytwarza obecnie własny mikroklimat chłodzący Grenlandię. Na ponowne zlodzenie Grenlandii po jej rozmrożeniu potrzeba nowej epoki lodowej

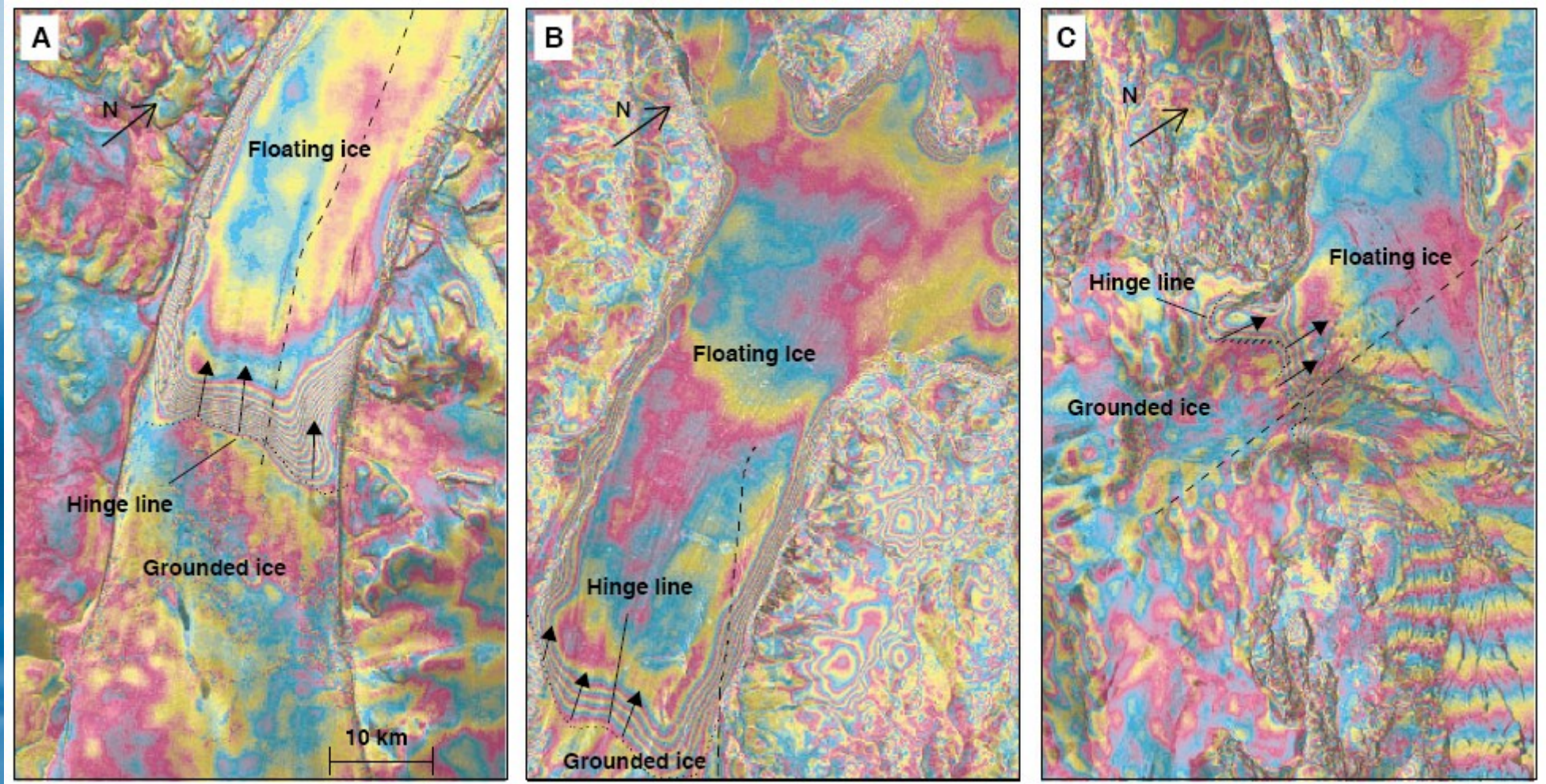
Czy roztopimy Grenlandię



Ocenia się, że wystarczy podwyższenie średniej rocznej temperatury o około 3 °C dla stopienia Grenlandii. Na rysunkach przewidywany wzrost temperatury rocznej i temperatury lata w modelach wykorzystujących scenariusze IPCC.

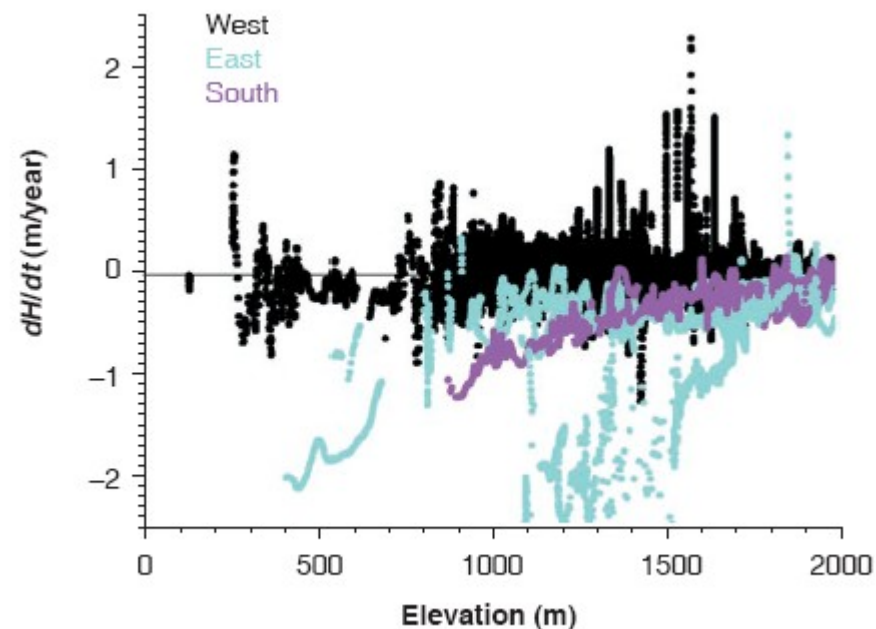
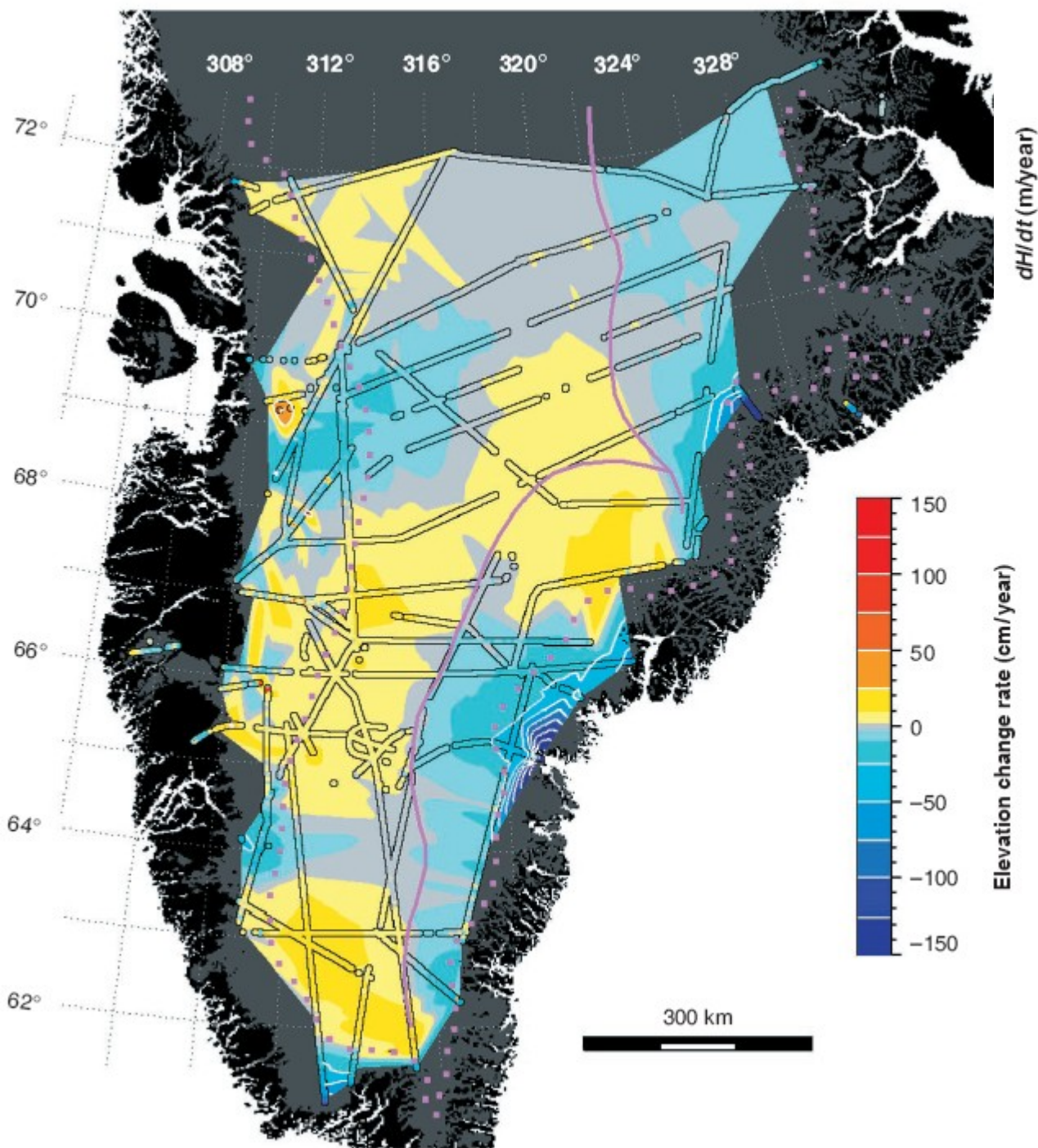
Większość scenariuszy osiąga temperaturę progową przed rokiem 2100. Jednak pełne stopienie lodów Grenlandii zajmie do 1000 lat.

Radar satelitarny a lodowce Grenlandii



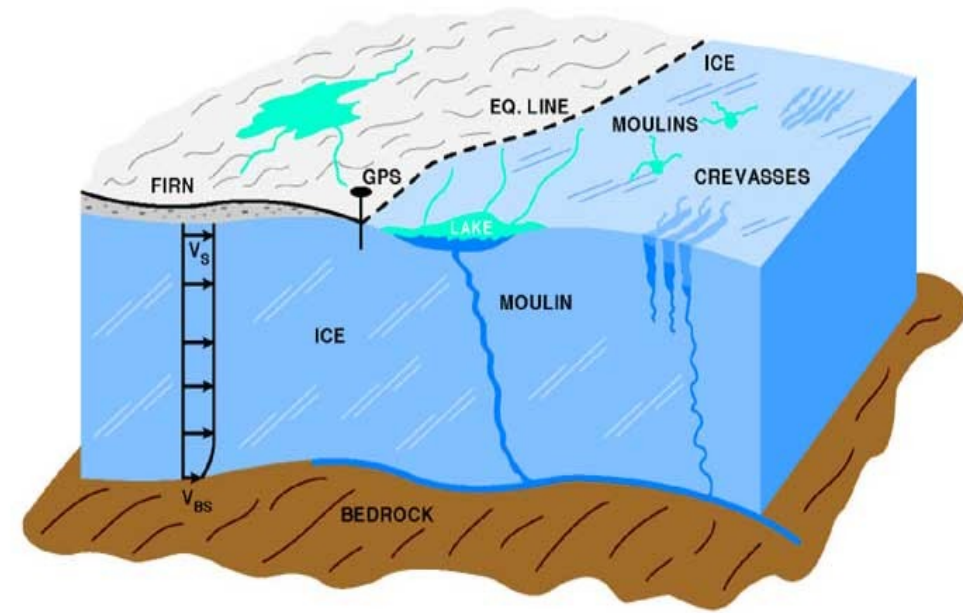
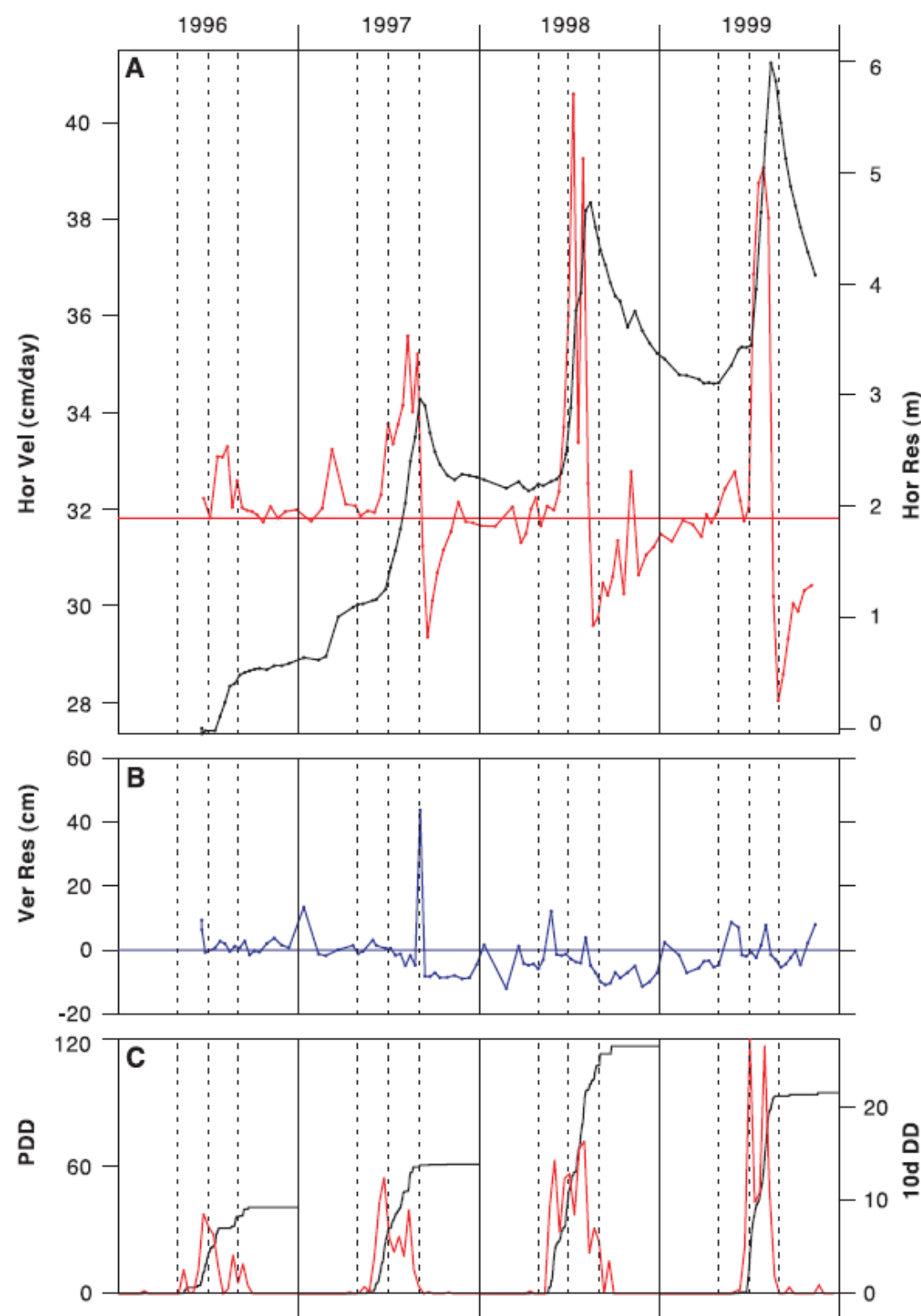
Interferometria radarowa (satelity ERS-1 i ERS-2) pozwala na zmierzenie nie tylko zmian wysokości lodowców ale także np. ustalenia *grounding line*, koniecznego dla dokonania bilansu masy. Obszar *grounding line* odznacza się licznymi liniami interferencyjnymi (linie co 28 mm ruchu w kierunku satelity w wyniku pływów morskich).

Samolotowa altimetria laserowa



Altimetria laserowa (lidarowa) wykonywana z samolotu (na mapie trasy przelotu) pozwoliła stwierdzić szybkie obniżanie lodowców poniżej linii 2000 m (fioletowe kropki), szczególnie na południu i wschodzie wyspy.

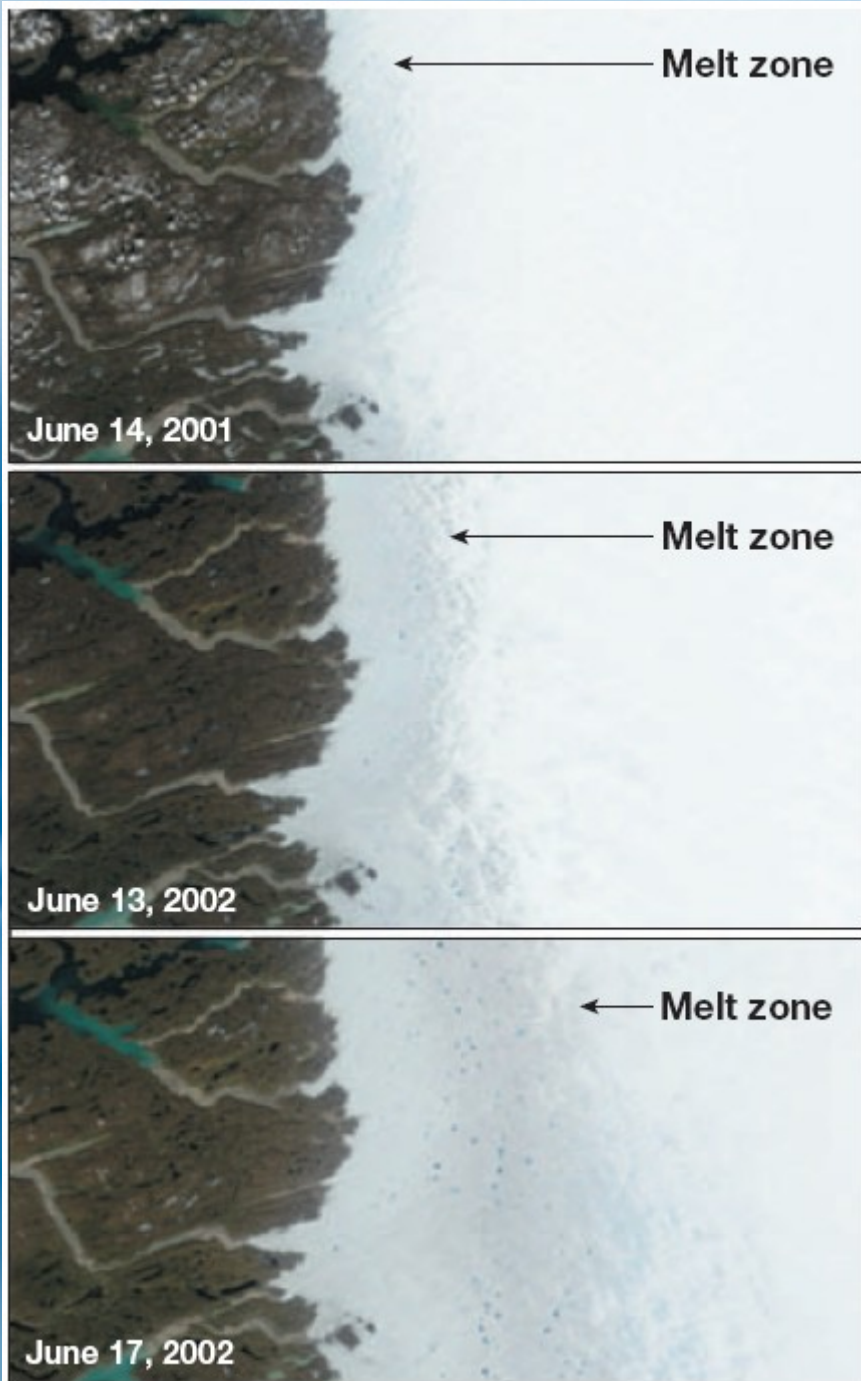
Woda smarem lodowców



Prędkość pozioma lodowca (góra), a także czasem pionowa (środek) proporcjonalna jest to ilości dni z temperaturą powyżej zera na powierzchni. Jedynym sposobem tak szybkiego przenikania sygnału do dna lodowca jest woda płynąca szczelinami lodowymi.

Zwally et al. 2002 (Science)

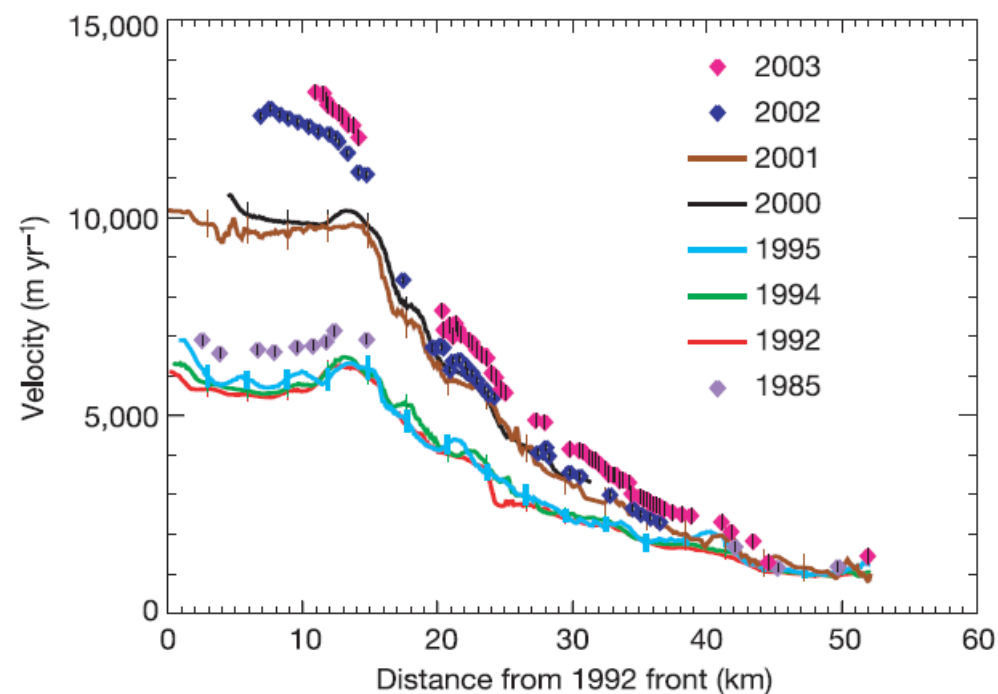
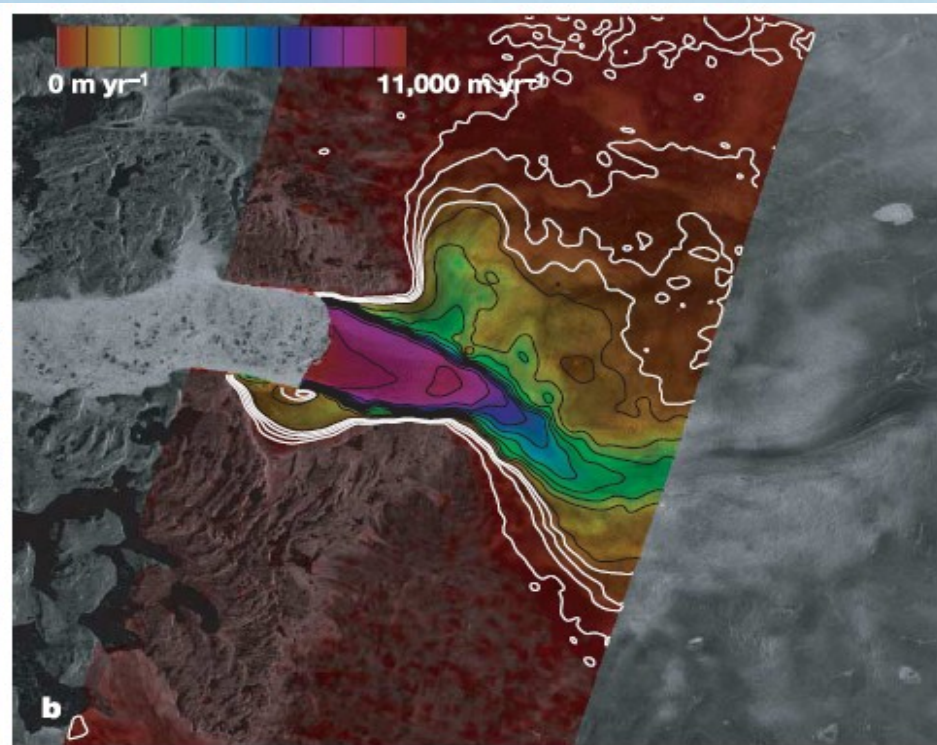
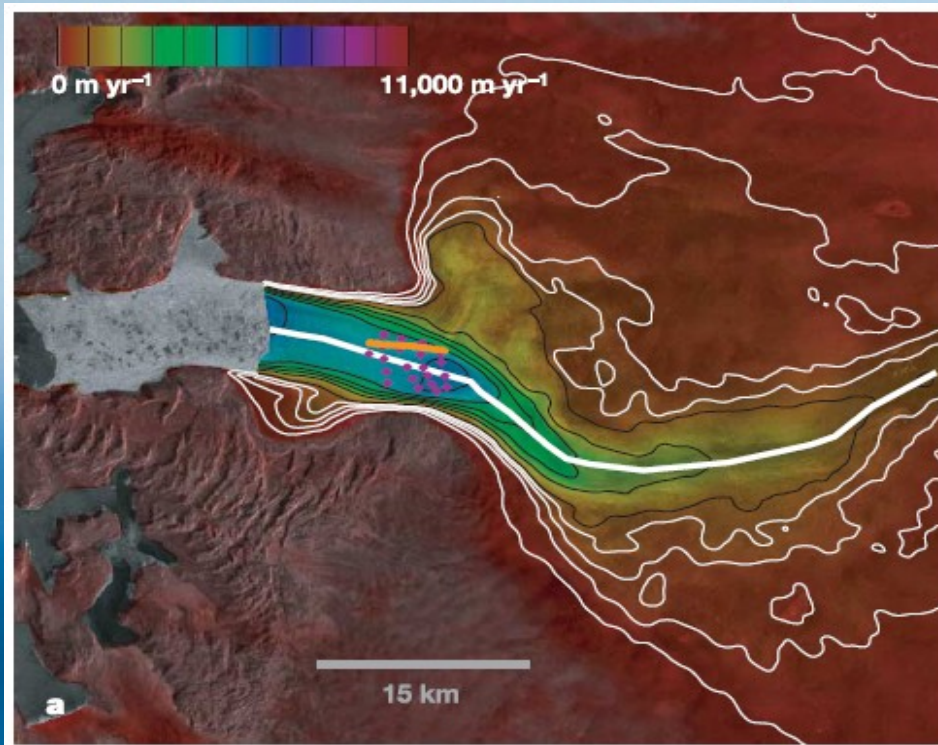
Szybsze topienie Grenlandii w ostatnich latach



W ciągu ostatnich kilku lat zanotowano coraz szybsze topnienie powierzchniowe lodowców Grenlandii, sięgające coraz wyższych wysokości.

Na rysunku zdjęcia satelitarne tego samego fragmentu brzegu lądolodu Grenlandii w kolejnych latach (*Uwaga na błąd w dacie dolnego panelu!*) pokazujący coraz większy zasięg topienia letniego.

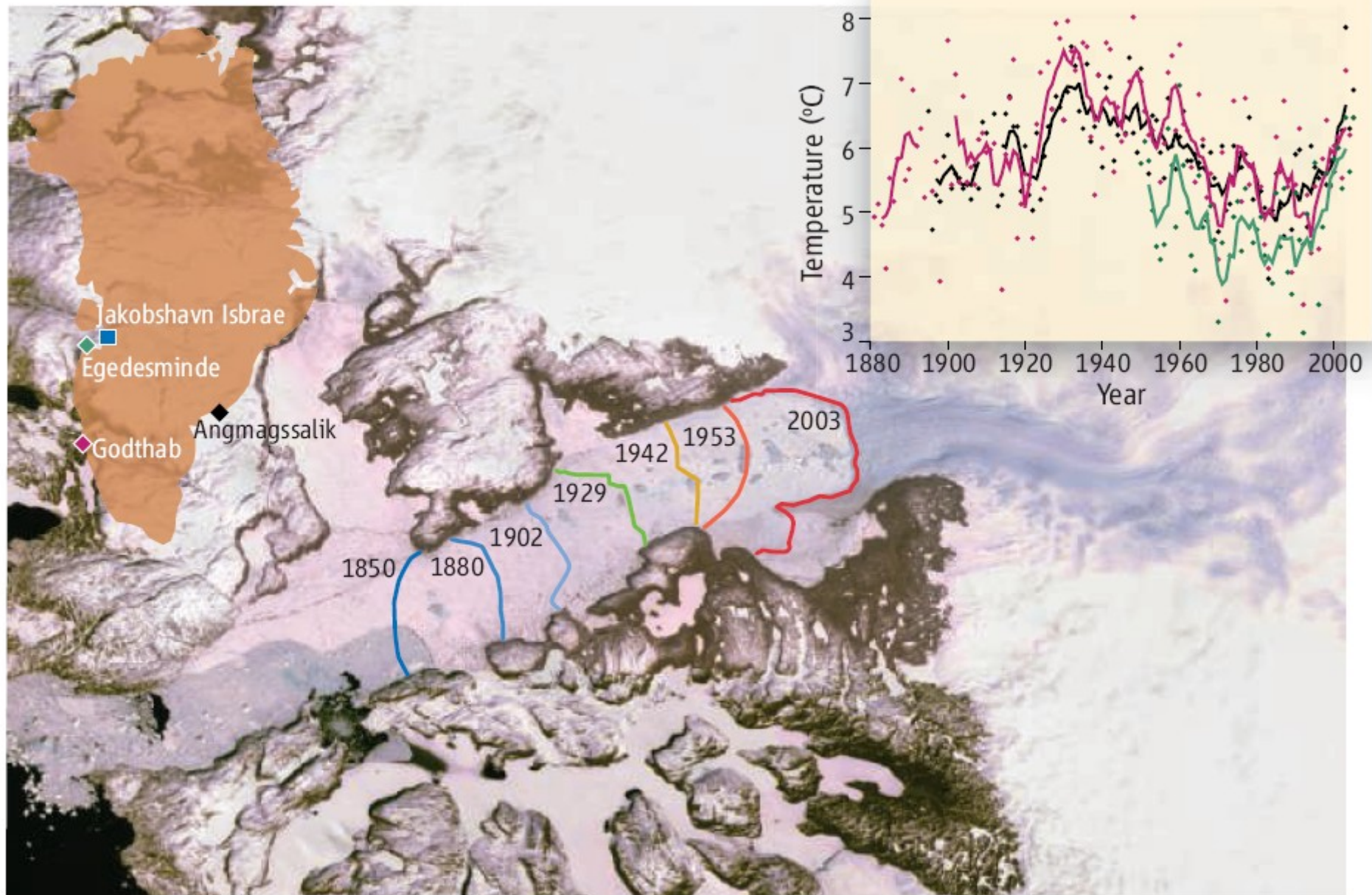
Lodowce posuwają się coraz szybciej



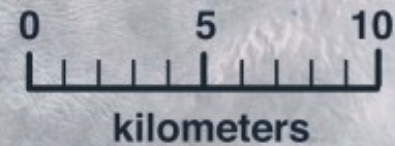
Prędkości lodu największego lodowca Grenlandii, Jakobshavn Isbrae, (satelitarna altimetria radarowa) w lutym 1992 i październiku 2000. Po lewej wykres prędkości (śledzenie punktów na zdjęciach Landsat) w funkcji odległości od frontu (z roku 1985) w poszczególnych latach. Widoczne jest zdecydowane przyspieszenie wypływu lodu.

Joughin et al. 2004 (Nature)

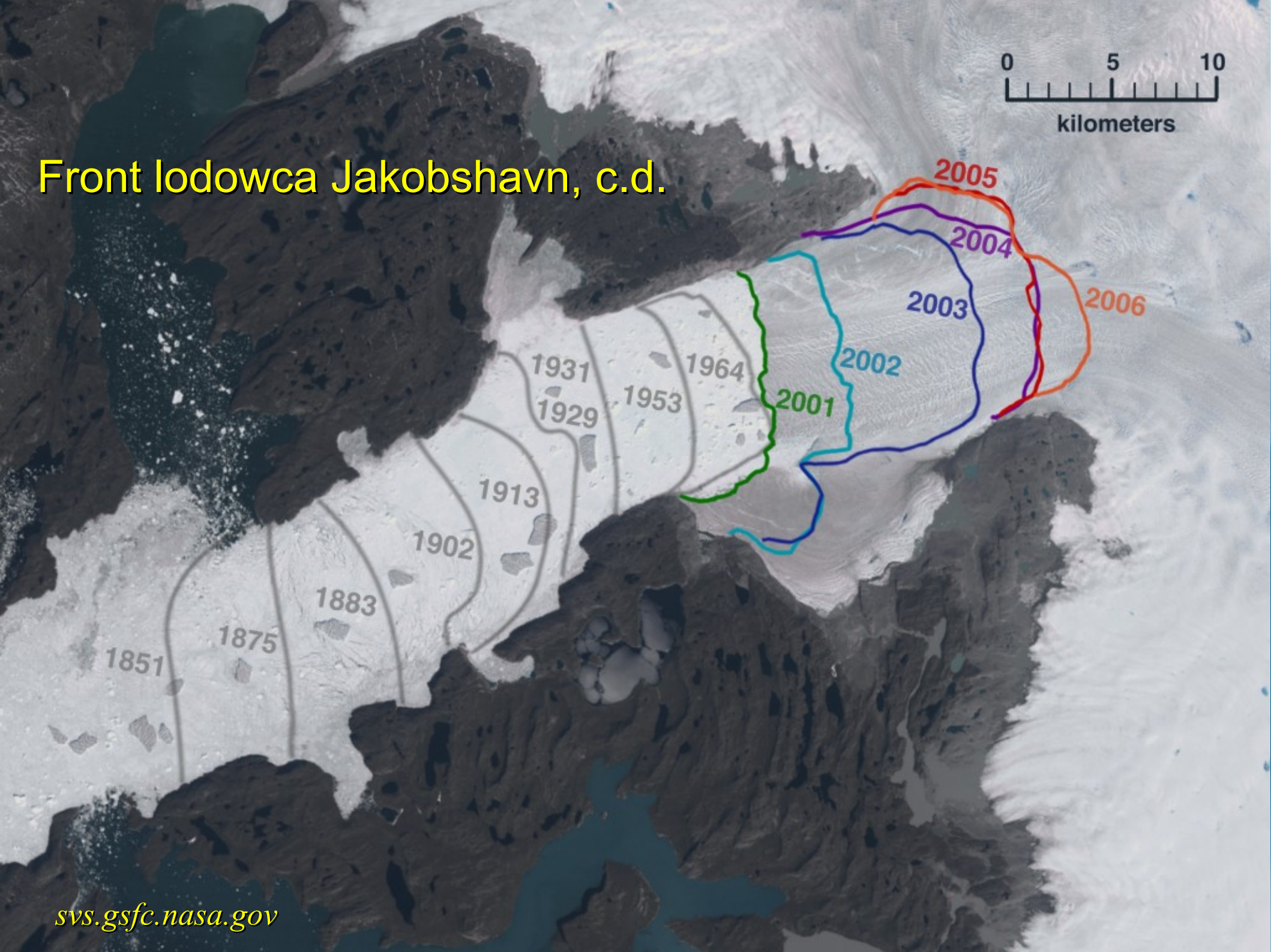
Jakobshavn Isbrae cofa się od Małej Epoki Lodowej

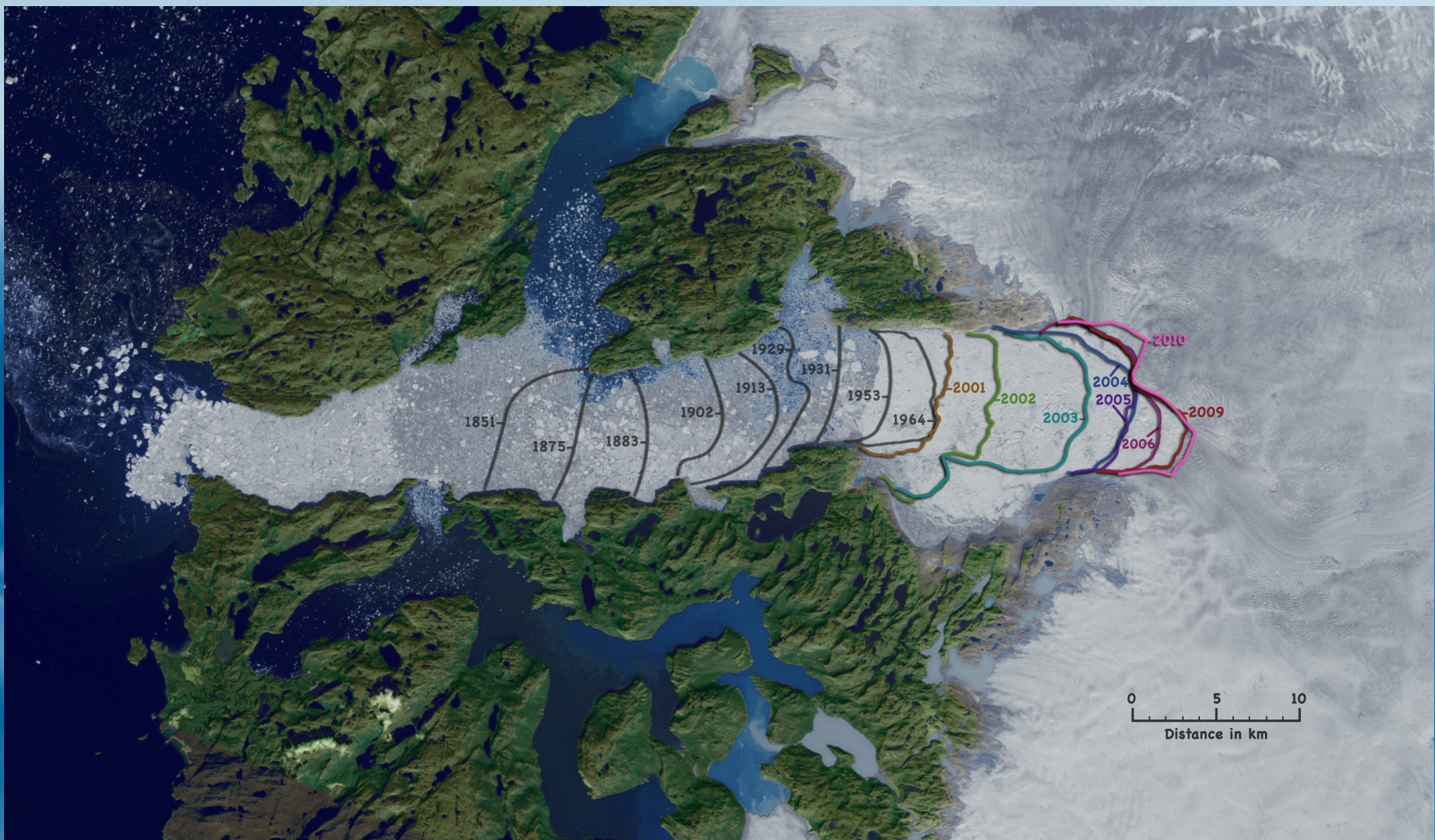


Na rysunku pozycje frontu lodowca oraz temperatury w zaznaczonych stacjach meteorologicznych Grenlandii.

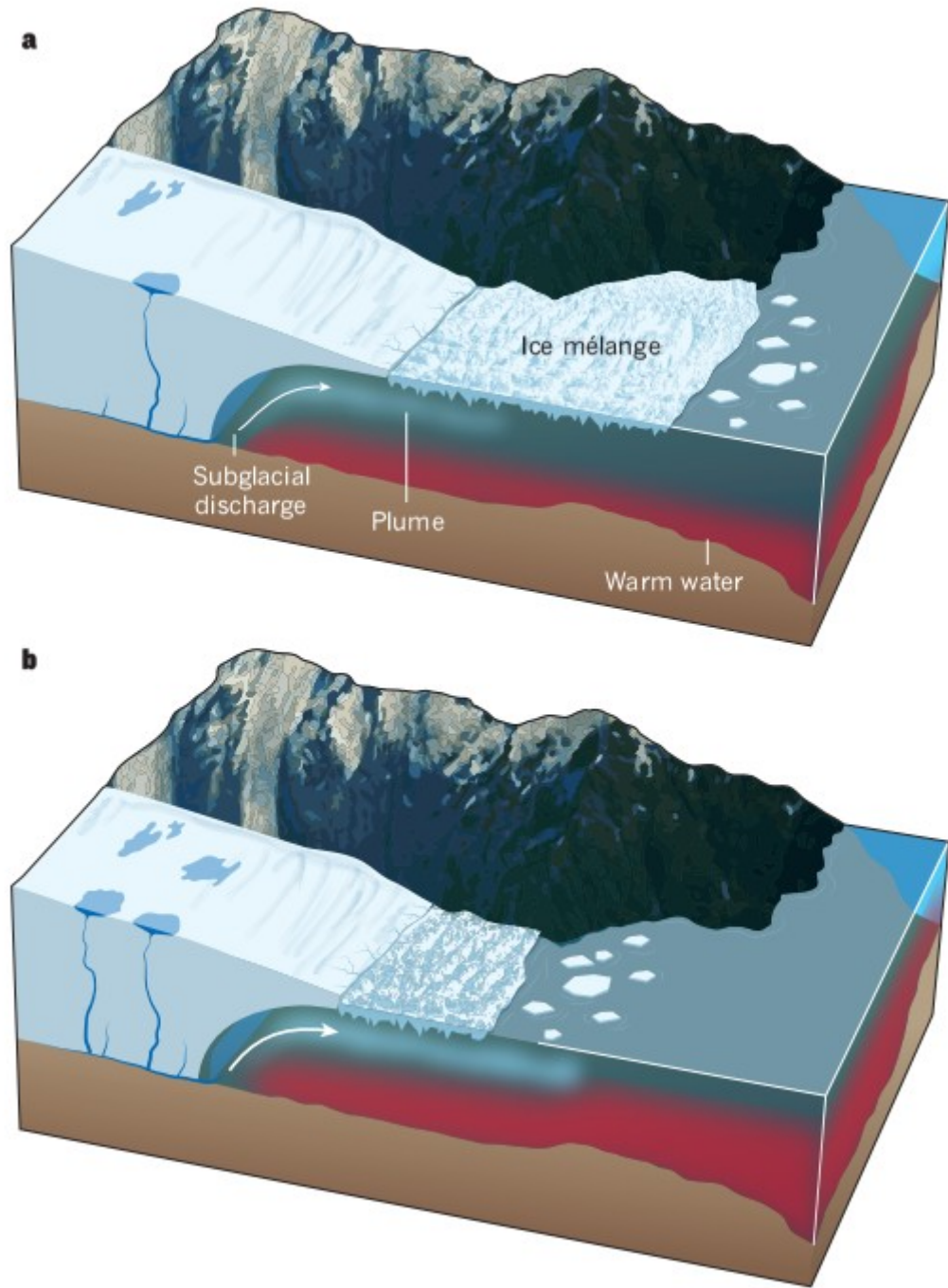


Front lodowca Jakobshavn, c.d.





Mechanizm przyśpieszenia lodowca: ciepło oceanu



Submarine melting. Warming subsurface ocean waters and increased glacier surface melt resulted in increased submarine melting and, potentially, a weakened ice mélange at the marine margins of Greenland's outlet glaciers. **a**, Pre-retreat conditions include relatively cold waters, limited subglacial discharge and a thick ice mélange. **b**, Retreat conditions include warm fjord waters, increased subglacial discharge and weakened mélange.

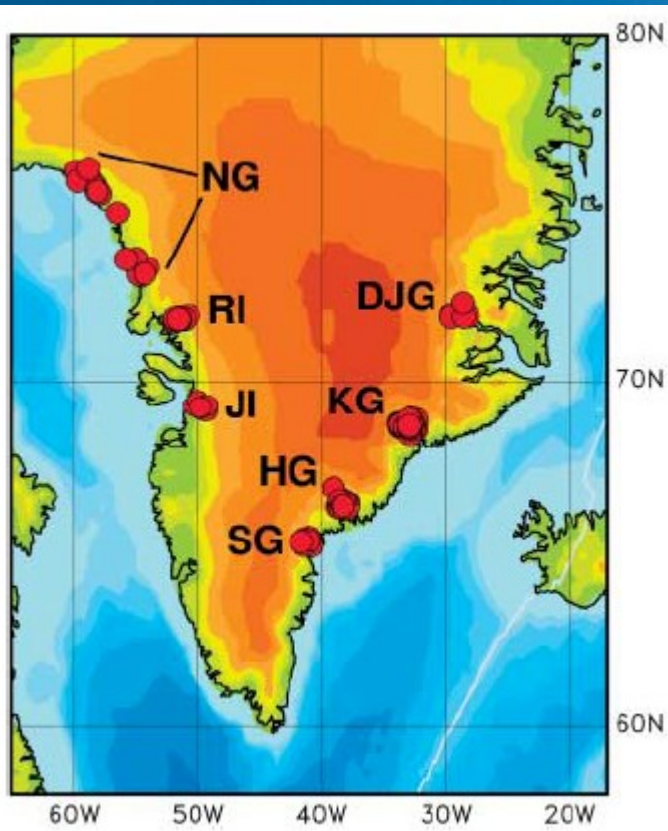
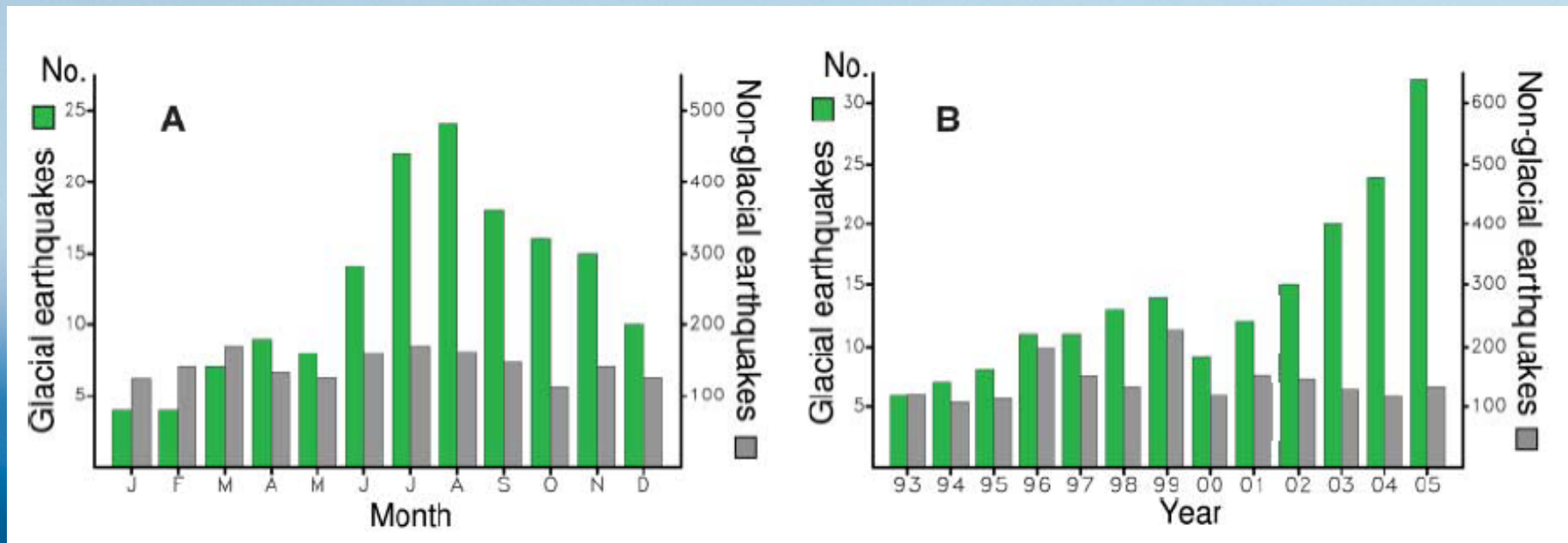
McCarty Glacier - Alaska



Muir and Riggs Glaciers

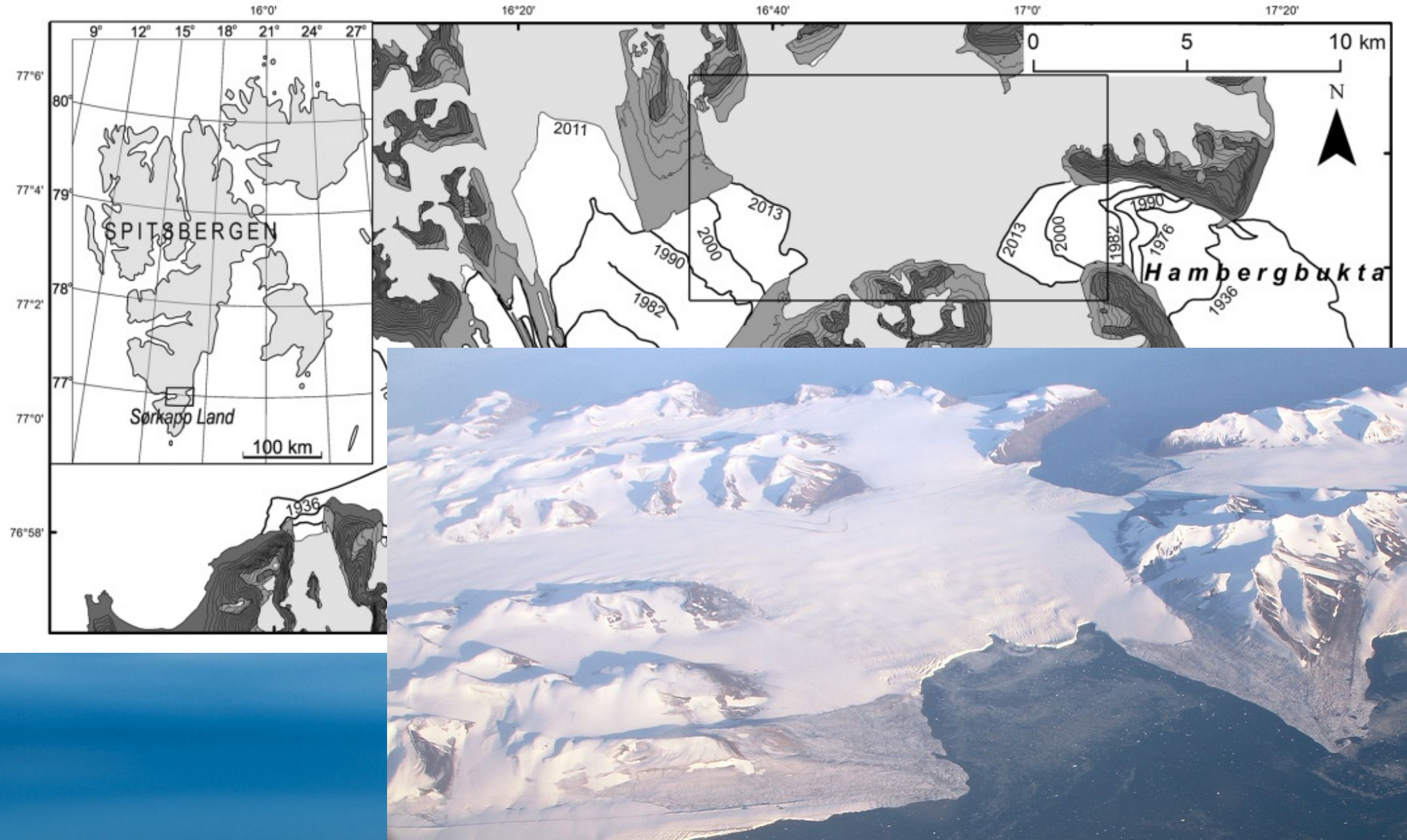


Trzęsienia lodu: dowód szybszego ruchu



O szybszym spływaniu lodowców do morza świadczą trzęsienia ziemi (a właściwie lodu) o sile 4.6 do 5.1 w skali Richtera notowane przez seismografy. Wszystkie pochodzą z lodowców (po lewej) o szybkim spływie, ponad 2 km/rok. Maksimum trzęsień latem (lewy panel) dowodzi wpływu wody roztopowej. Wzrost ilości w ostatnich latach (prawy panel) związany jest większym topieniem powierzchni lodowców.

Kiedy Hornsund będzie cieśniną (zgodnie ze swoją nazwą)?



Pomiędzy Hornsundem, a Morzem Barentsa pozostało już tylko kilka kilometrów (6 km w 2013 r). Hornsund przestanie być fiordem zapewne przed rokiem 2035.

Ziaja & Ostafin 2015 (AMBIO)

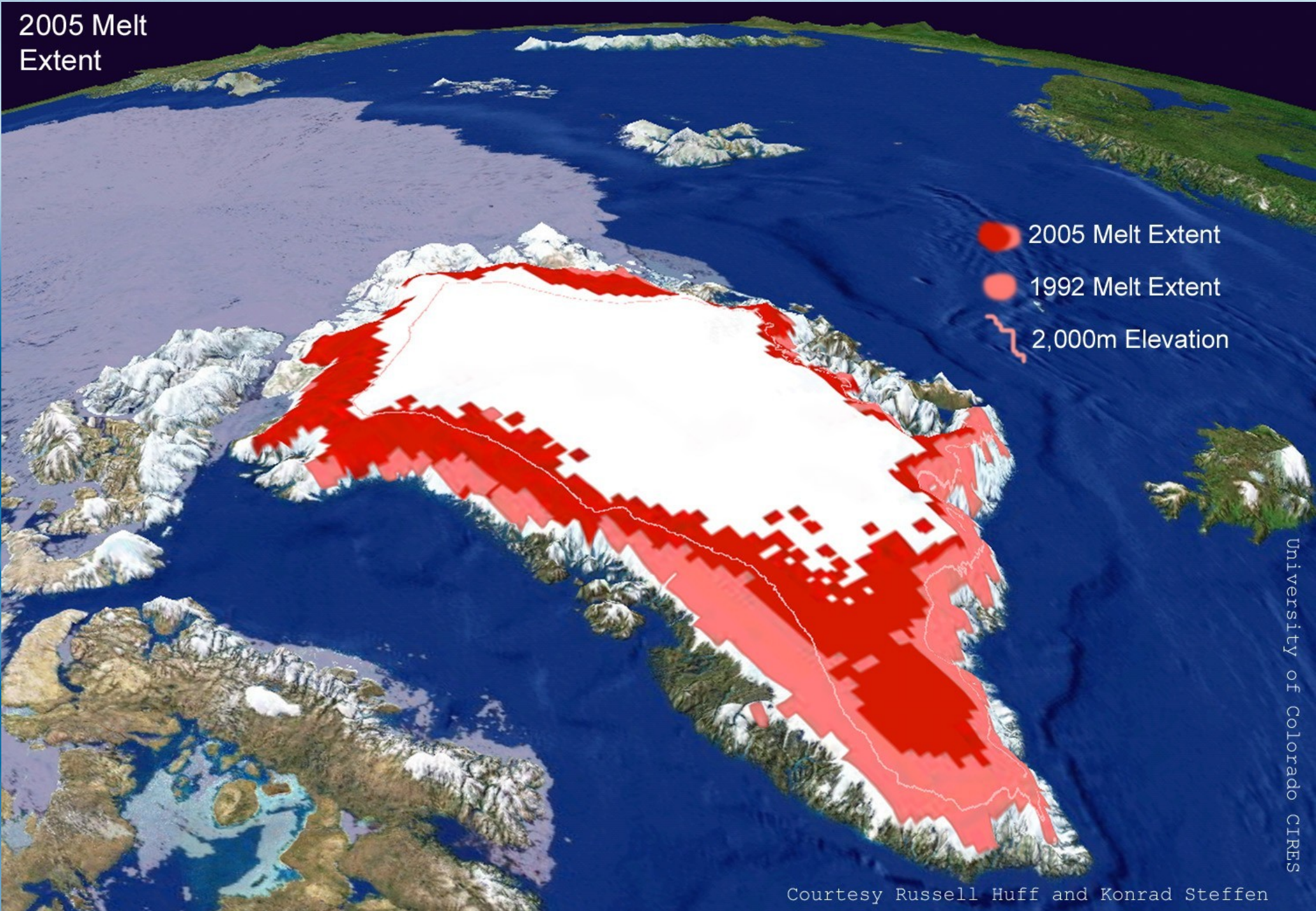
Topienie się lądolodu Grenlandii: 1992 i 2005

2005 Melt
Extent

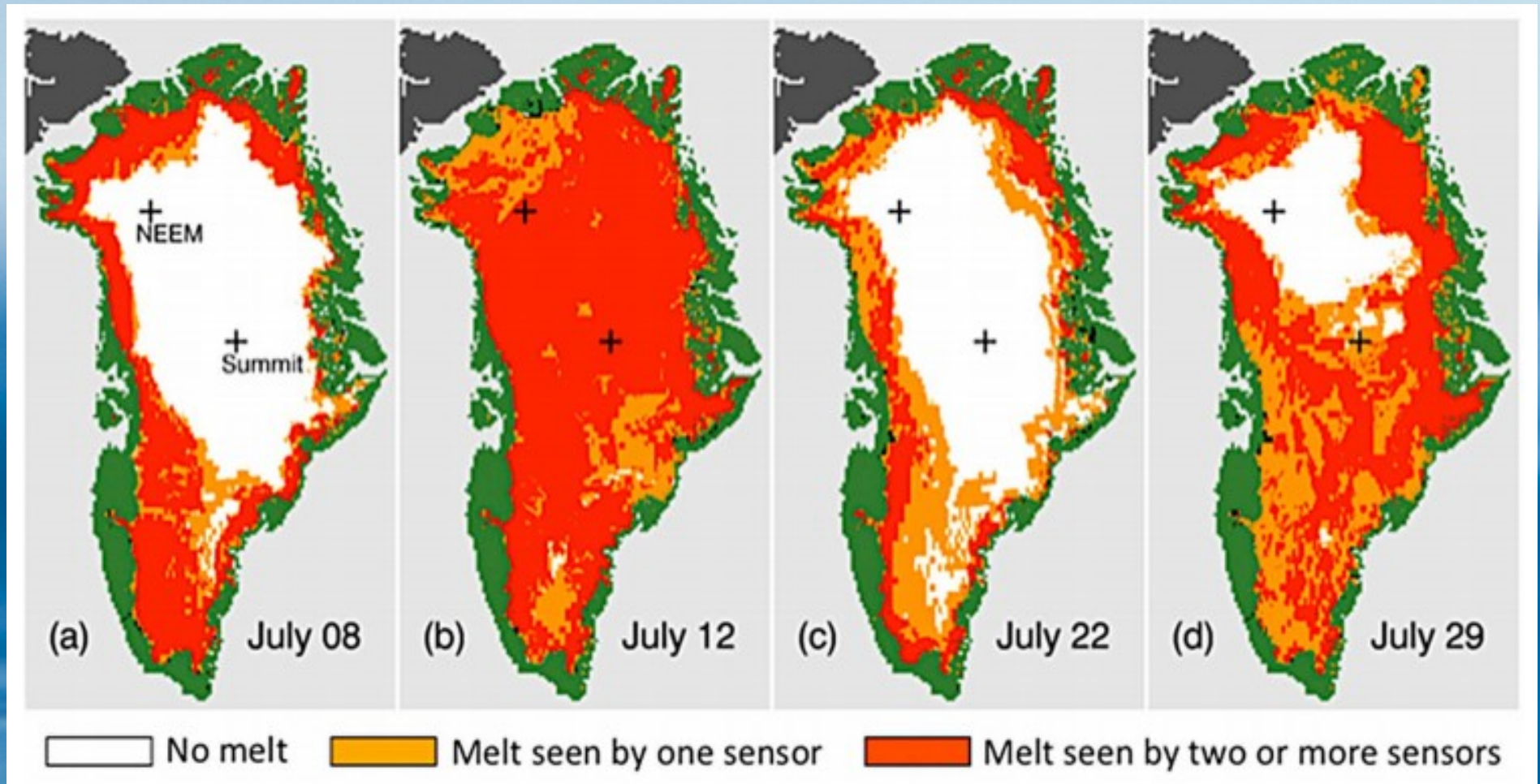
- 2005 Melt Extent
- 1992 Melt Extent
- 2,000m Elevation

University of Colorado CIRES

Courtesy Russell Huff and Konrad Steffen



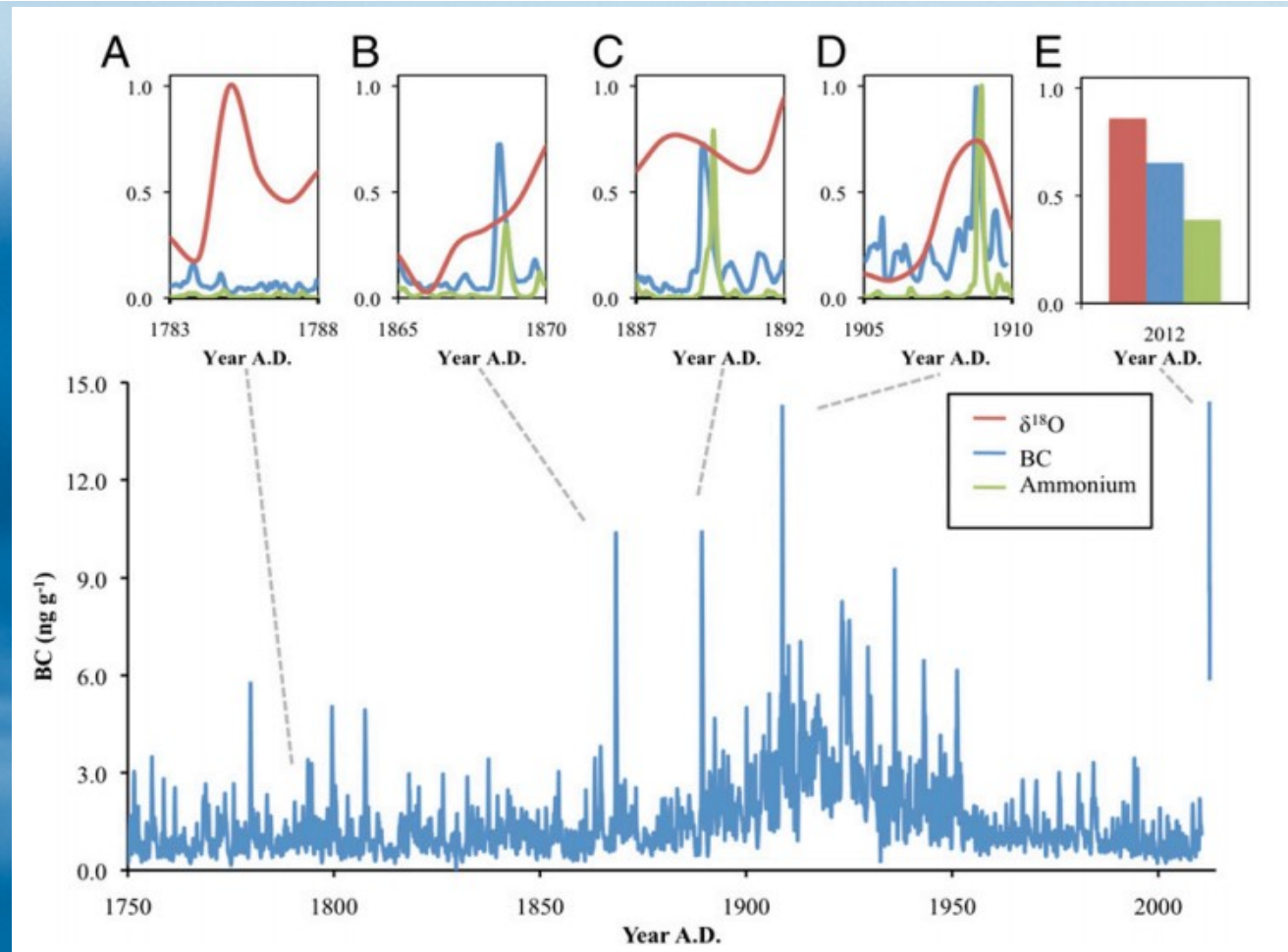
Wielkie topienie w lipcu 2012



12 lipca 2012 powierzchniowe topnienie objęło 98,6% lądolodu Grenlandii. Poprzednie podobne zdarzenie miało miejsce w roku 1889 a jeszcze wcześniejsze siedem wieków wcześniej w Ciepłym Okresie Średniowiecznym.

Climate change and forest fires synergistically drive widespread melt events of the Greenland Ice Sheet

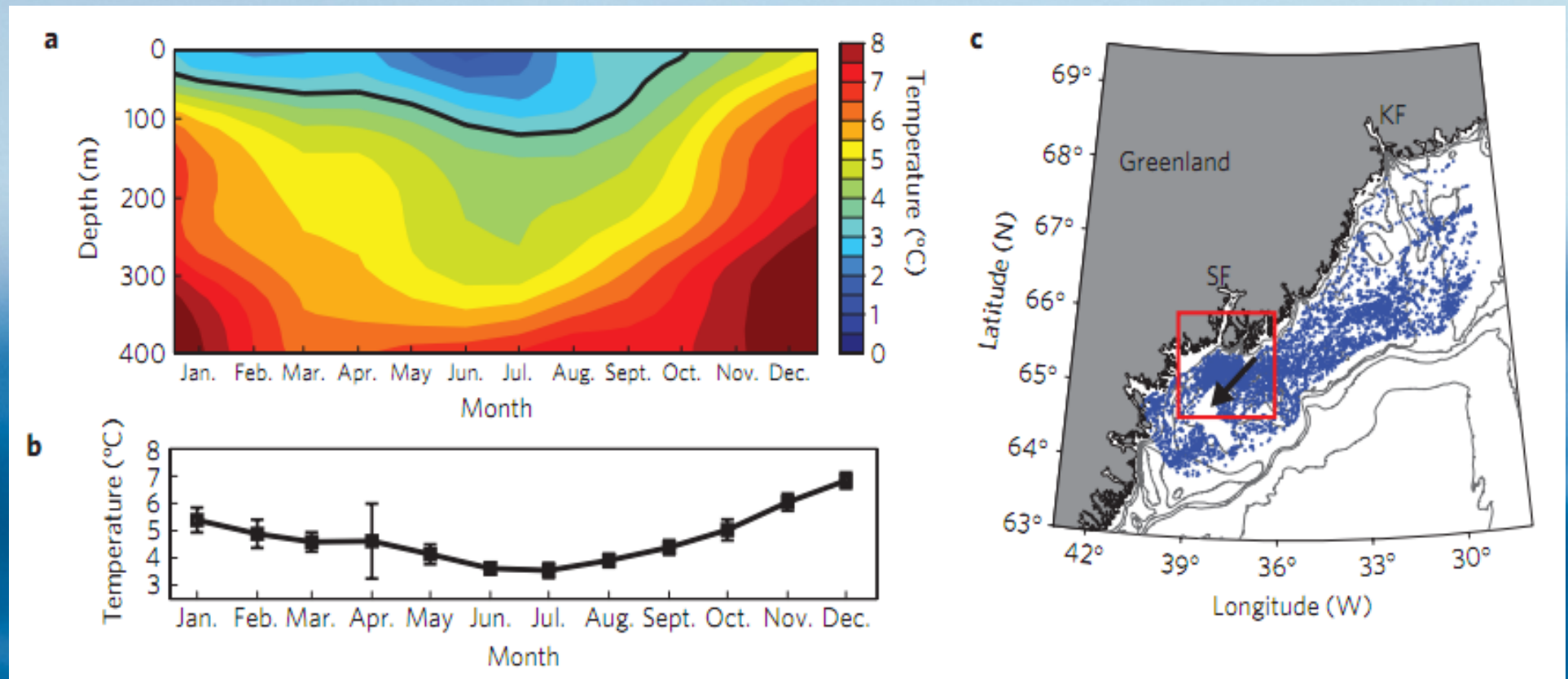
Kaitlin M. Keegan^{a,1}, Mary R. Albert^a, Joseph R. McConnell^b, and Ian Baker^a



Epizody rozległego topnienia powierzchniowego na Grenlandii są związane z opadami sadzy z pożarów lasów (również 1889 i 2012). Jednak globalne ocieplenie ułatwia wystąpienie takich zjawisk. Na rysunku $\delta^{18}\text{O}$ jest miarą temperatury a BC i amoniak opadów sadzy pochodzącej z pożarów

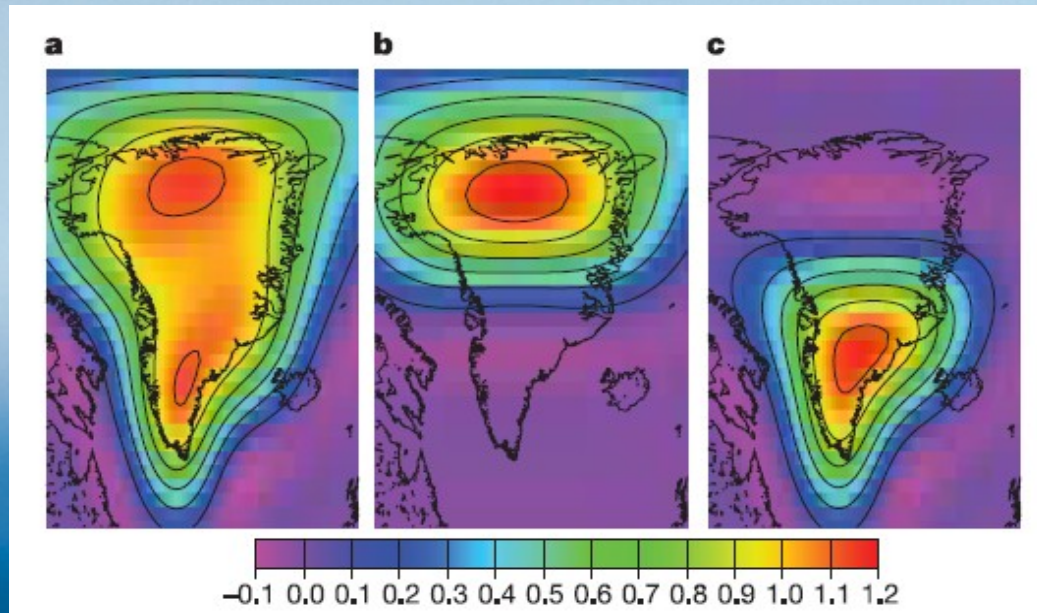
Keegan et al 2014 (PNAS)

Ciepłe prądy topią także lodowce Grenlandii

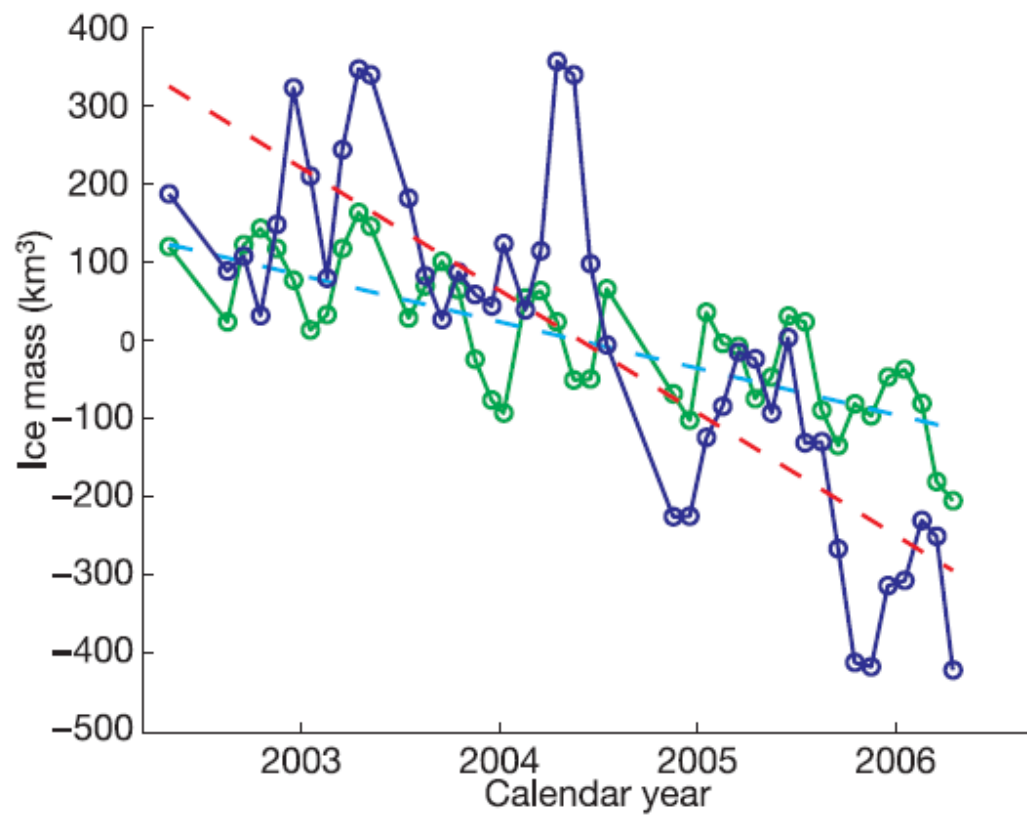


Wyniki temperatury wody morskiej w funkcji głębokości i miesiąca (a) oraz średnia temperatura najwyższych 400 m wody (b) uzyskane z sondowania rejonów Szelfu Wschodniogrenlandzkiego przy pomocy fok kapturowych z sondami STD (5269 nurkowań) w miejscach zaznaczonych (c). Linia na panelu a odgranicza słodsze i zimniejsze wody polarne (na górze) od wód subtropikalnych (na dole).

Pomiary grawitacyjne: jeszcze szybszy ubytek lodu



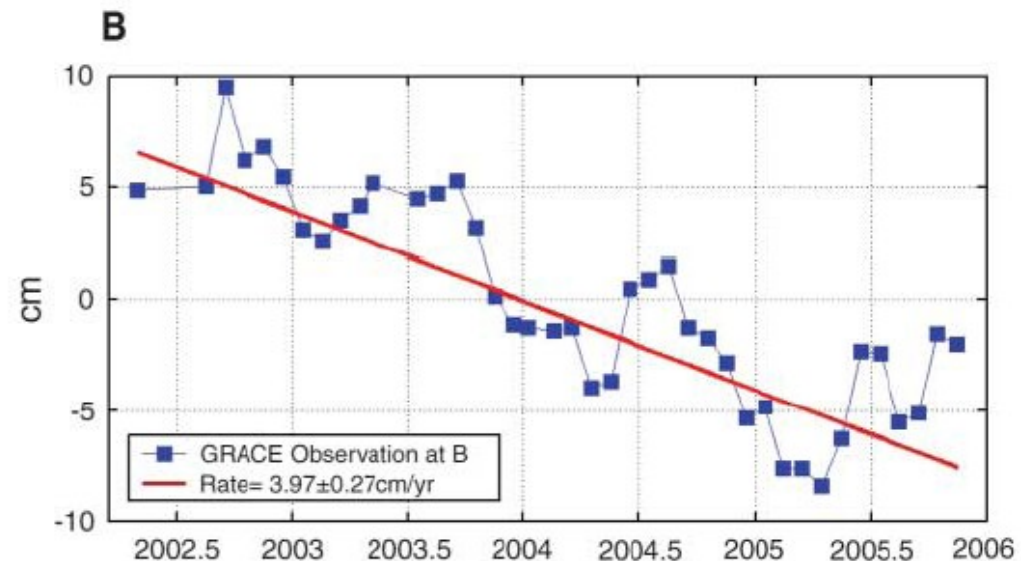
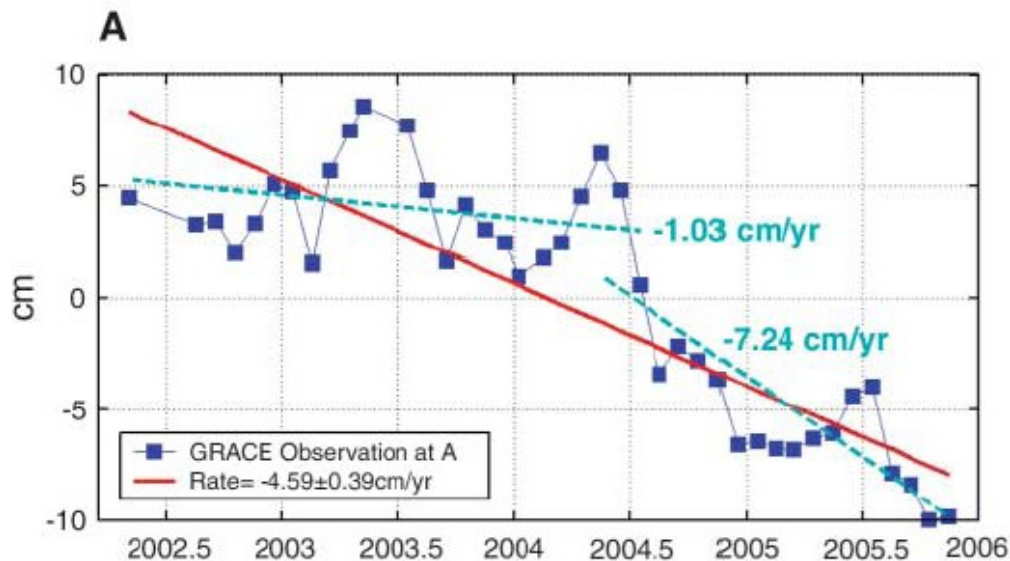
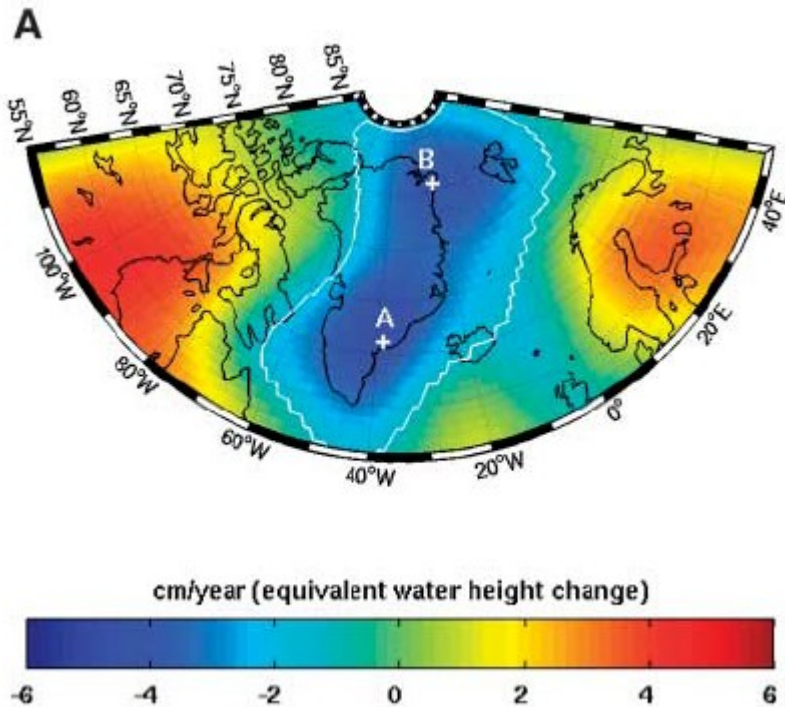
Pomiary grawitacyjne misji GRACE pozwoliły na wyliczenie bilansu masy lodu Grenlandii. Wynik $-248 \pm 36 \text{ km}^3/\text{rok}$ odpowiada przyrostowi poziomowi oceanu o $+0.5 \pm 0.1 \text{ mm/rok}$. Wcześniejsze szacunki bilansu Grenlandii dawały wartości od -0.02 do $+0.09 \text{ mm/rok}$.



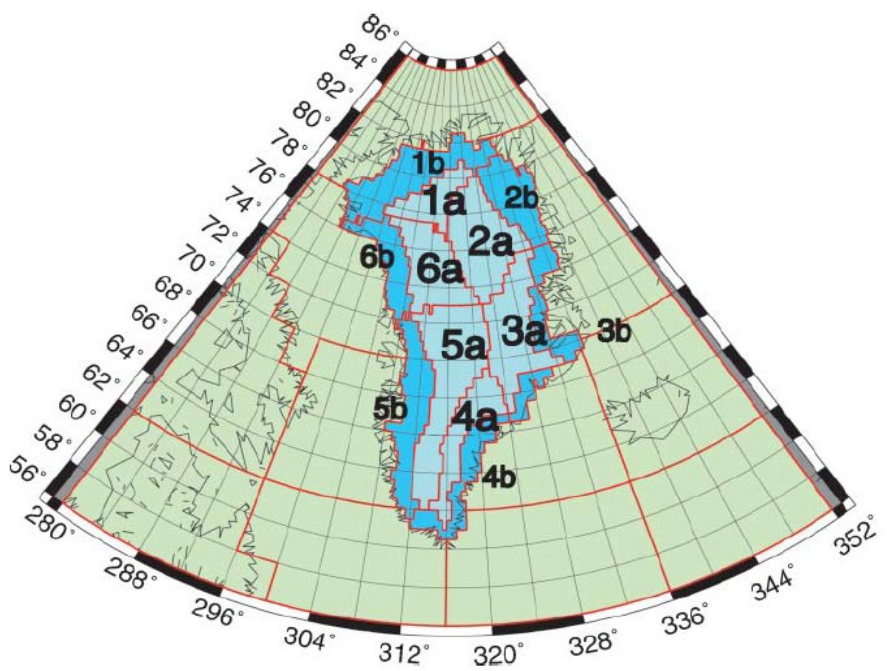
Podział Grenlandii na dwa obszary (góra) pozwolił oszacować straty masy północnej (niebieska linia i czerwony trend) i południowej (zielona linia i błękitny trend) Grenlandii odpowiednio na $-161 \pm 24 \text{ km}^3/\text{rok}$ i $-83 \pm 18 \text{ km}^3/\text{rok}$.

Inna analiza wyników GRACE

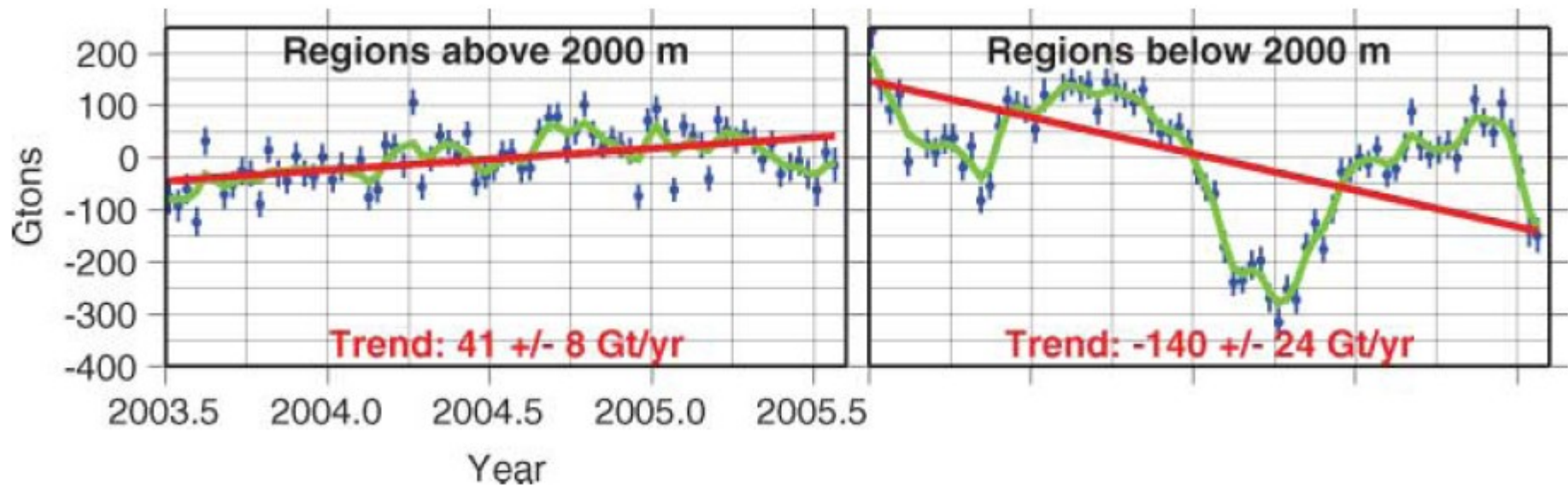
Inna analiza wyników Grace pozwoliła na dokładniejsze geograficznie wyznaczenie zmian grawitacyjnych (po lewej). Widoczne jest izostatyczne podnoszenie się Skandynawii i Pn. Kanady i ubytek masy Grenlandii. Poniżej trendy zmian w punktach A i B (na południu ubytek coraz szybszy). Całkowity ubytek masy lodu grenlandzkiego oszacowano tu na $-239 \pm 23 \text{ km}^3/\text{rok}$.



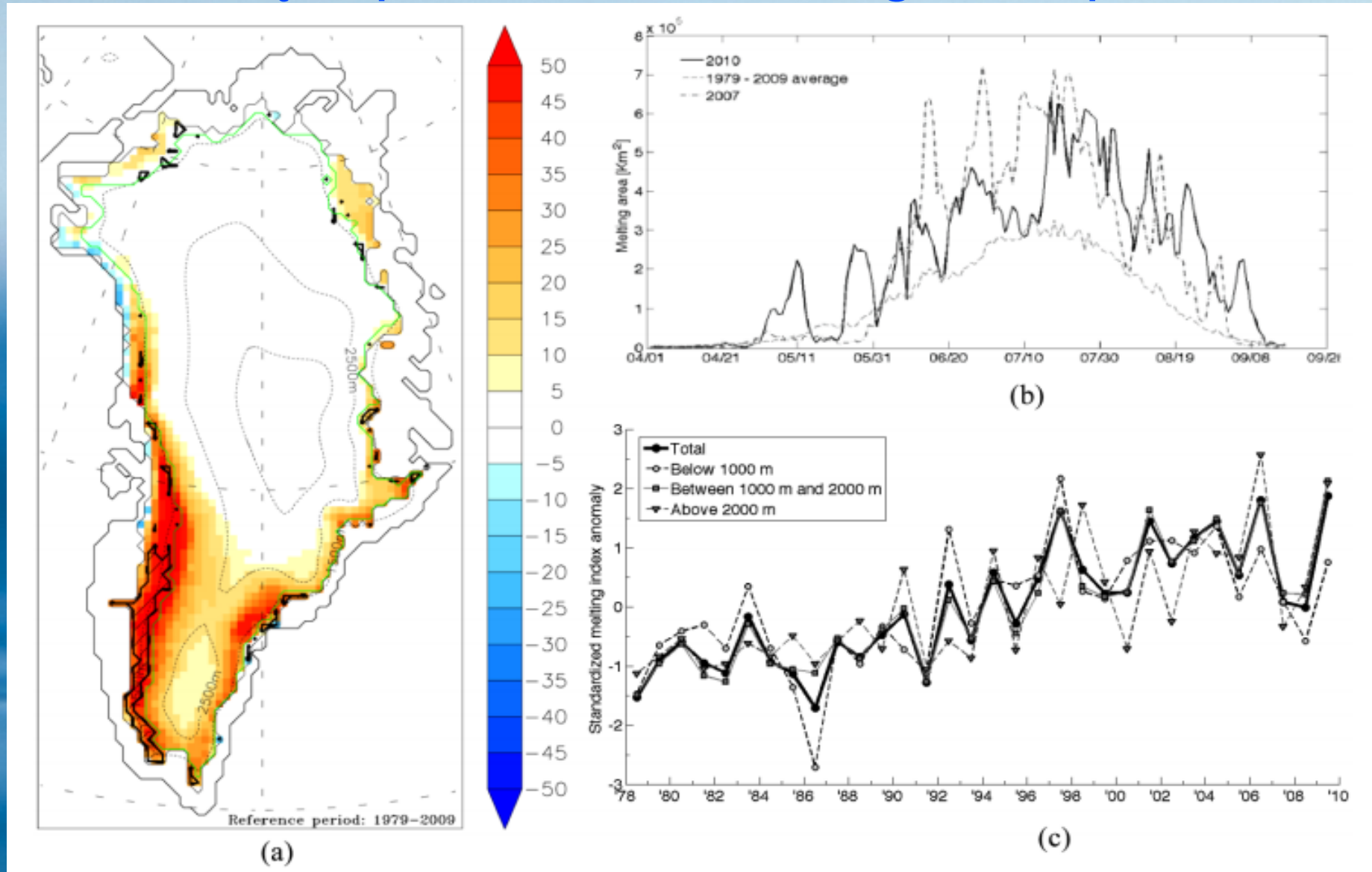
Jeszcze inna analiza wyników GRACE



Jeszcze inna analiza wyników GRACE przyniosła niższe oszacowanie zmian masy lodu Grenlandii w latach 2003-2005: łącznie $-113 \pm 17 \text{ km}^3/\text{rok}$ z podziałem na rejony poniżej 2000 m ($-140 \pm 24 \text{ km}^3/\text{rok}$) oraz powyżej ($+41 \pm 8 \text{ km}^3/\text{rok}$). Jednak ogólny trend jest również ujemny .



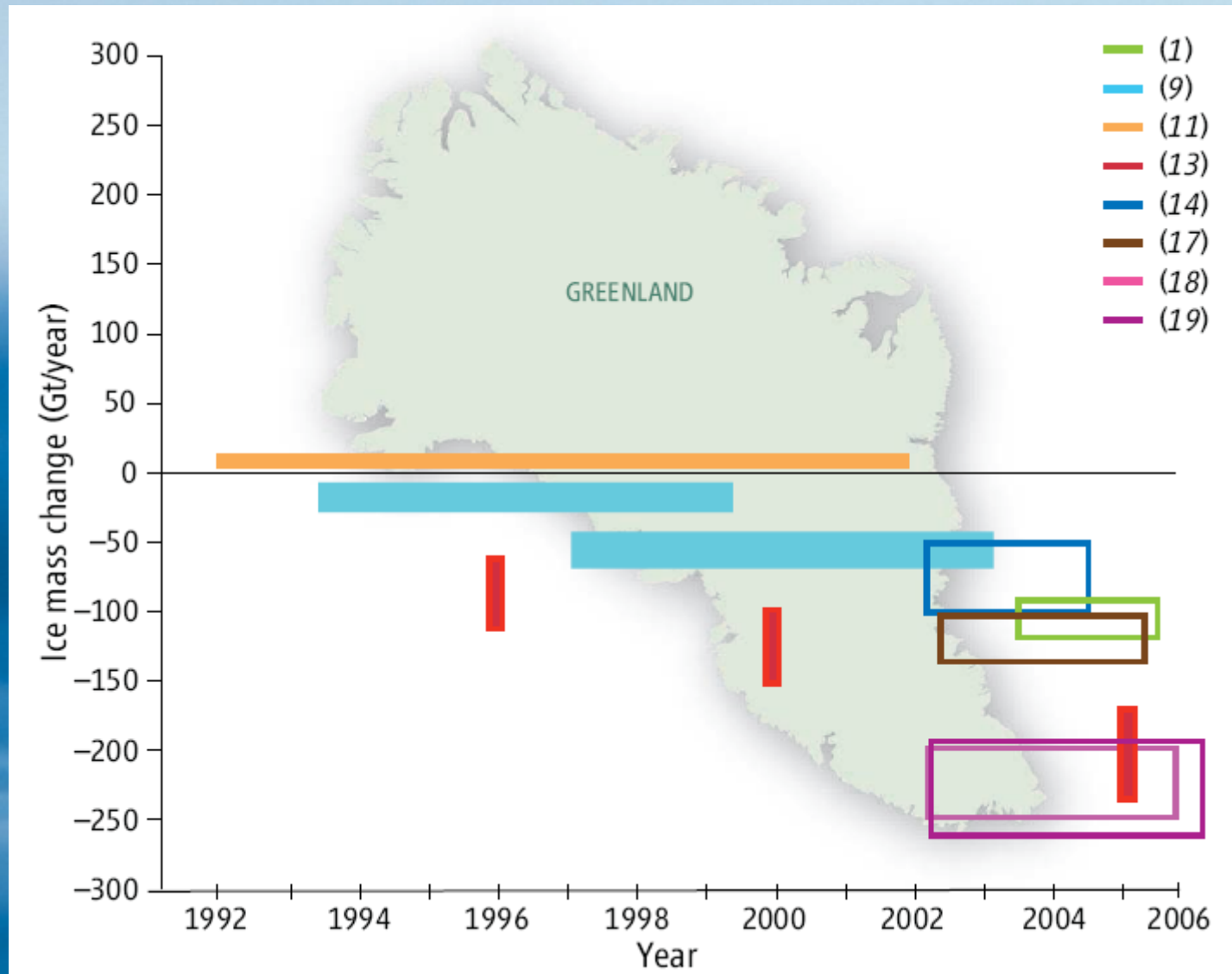
Rosnąca powierzchnia i długość topienia



Anomalia ilości dni topienia w 2010 roku z danych satelitarnych (a), zasięg topienia w 2007, 2010 i średnia dla 1979–2009 w funkcji dnia (b) i indeks topienia (ilość dni topienia razy obszar topienia) dla całej Grenlandii oraz dla wybranych wysokości n.p.m.

Tedesco et al. 2011 (Environmental Research Letters)

Bilans bilansów



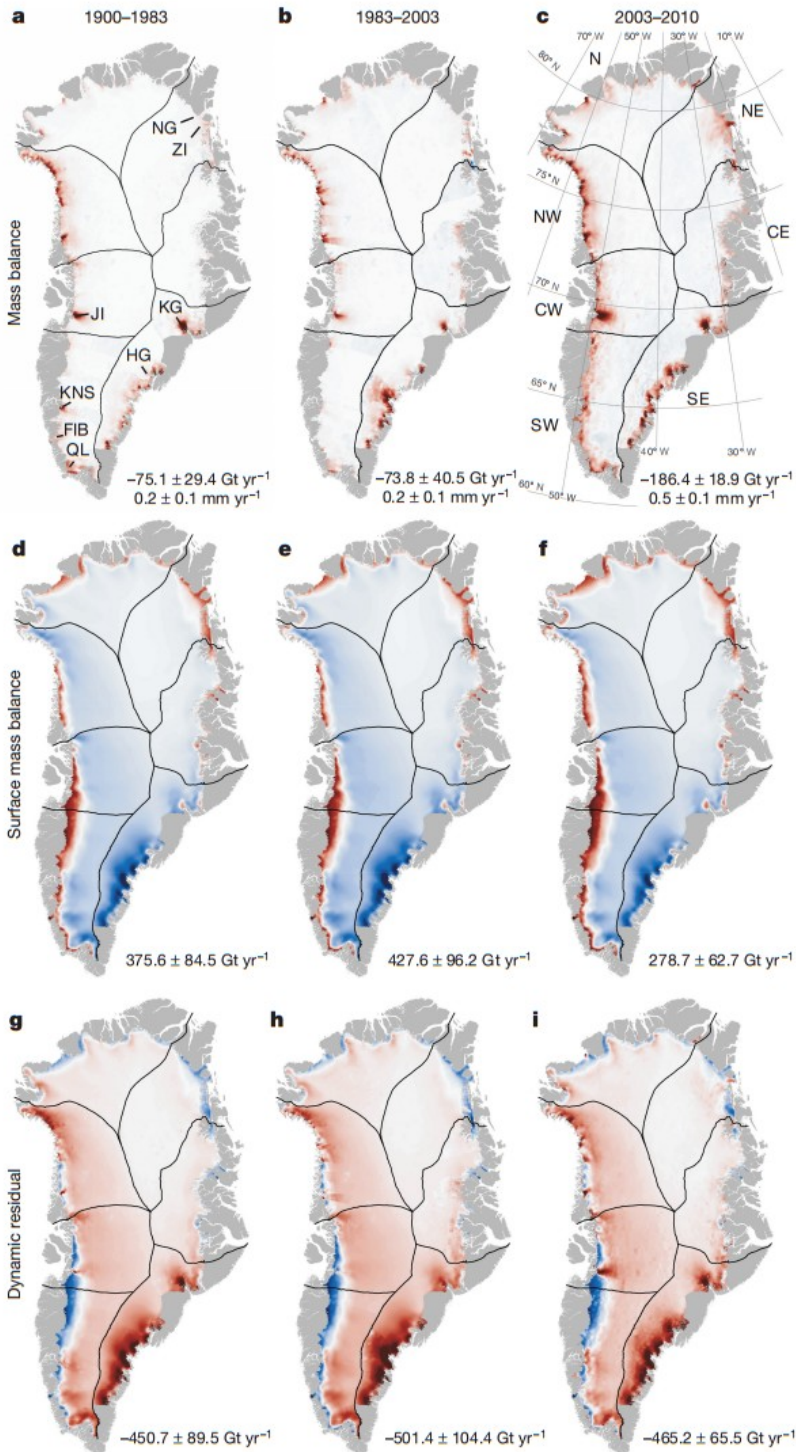
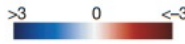
Bilans masy lodu dla Grenlandii zmienia się na coraz bardziej ujemny najprawdopodobniej zarówno dzięki poprawie metod pomiarowych oraz zmian klimatu.

Bilans powierzchniowy i “residuum dynamiczne”

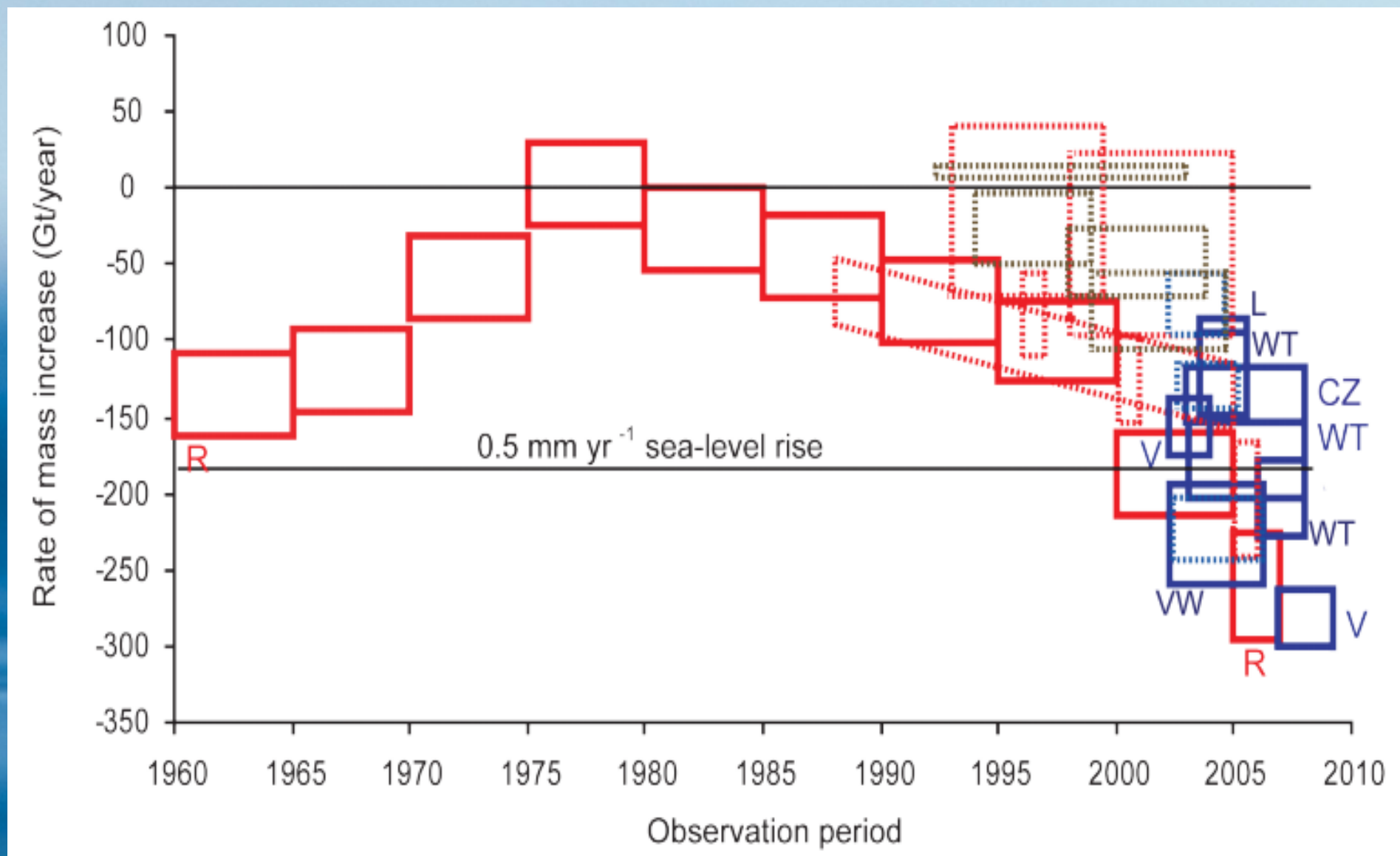
Na podstawie dawnych zdjęć lotniczych sporządzono bilans zmian wysokości powierzchni lądolodu Grenlandii (góra), z danych meteorologicznych wyliczono bilans powierzchniowy (P-E) (środek), a z ich różnicy wyliczono “residuum dynamiczne” czyli prędkość spływania lodu do oceanu (dół). Okazuje się, że tempo zmian wysokości było podobne w latach 1900-1983 i 1983-2003, natomiast ubytek masy przyspieszył po tej dacie. Wyliczenie bilansu powierzchniowego (ostatnio znacznie mniej dodatniego) wskazuje, na to, że tempo spływu lądolodu niewiele się zmieniło. Ubytek masy wynika ze zmniejszającej się nadwyżki opadów nad parowaniem/topieniem. Czy zatem Grenlandia stopi się od góry?

Kjeldsen et al 2015 (Nature)

Surface elevation change rate (m yr^{-1})



Bilans bilansów dla Grenlandii



Bilans masy lodu dla Grenlandii (Gt/rok) zmienia się na coraz bardziej ujemny. Tu jeszcze wyraźniej niż na Antarktydzie widać, że to nie poprawa metod pomiarowych a raczej zmiany klimatu.

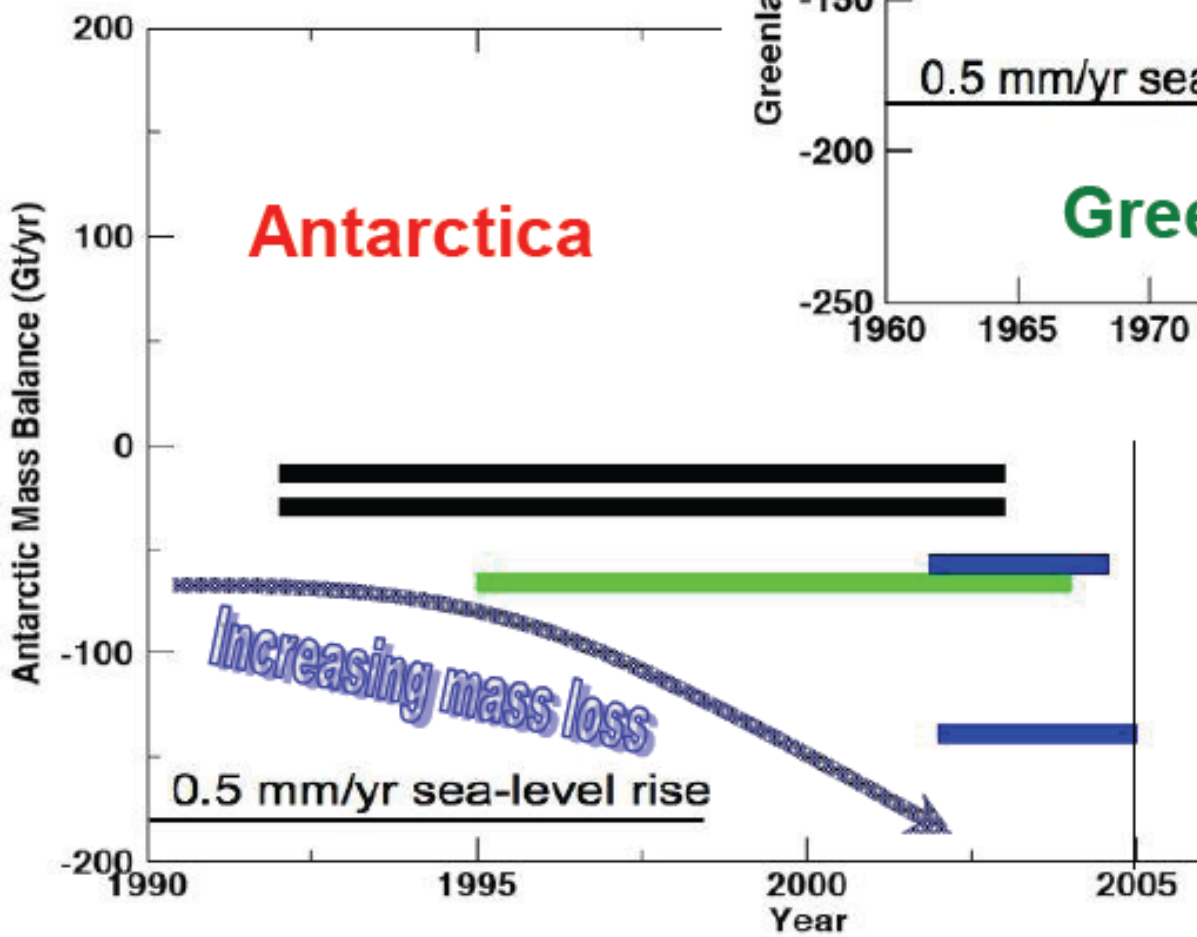
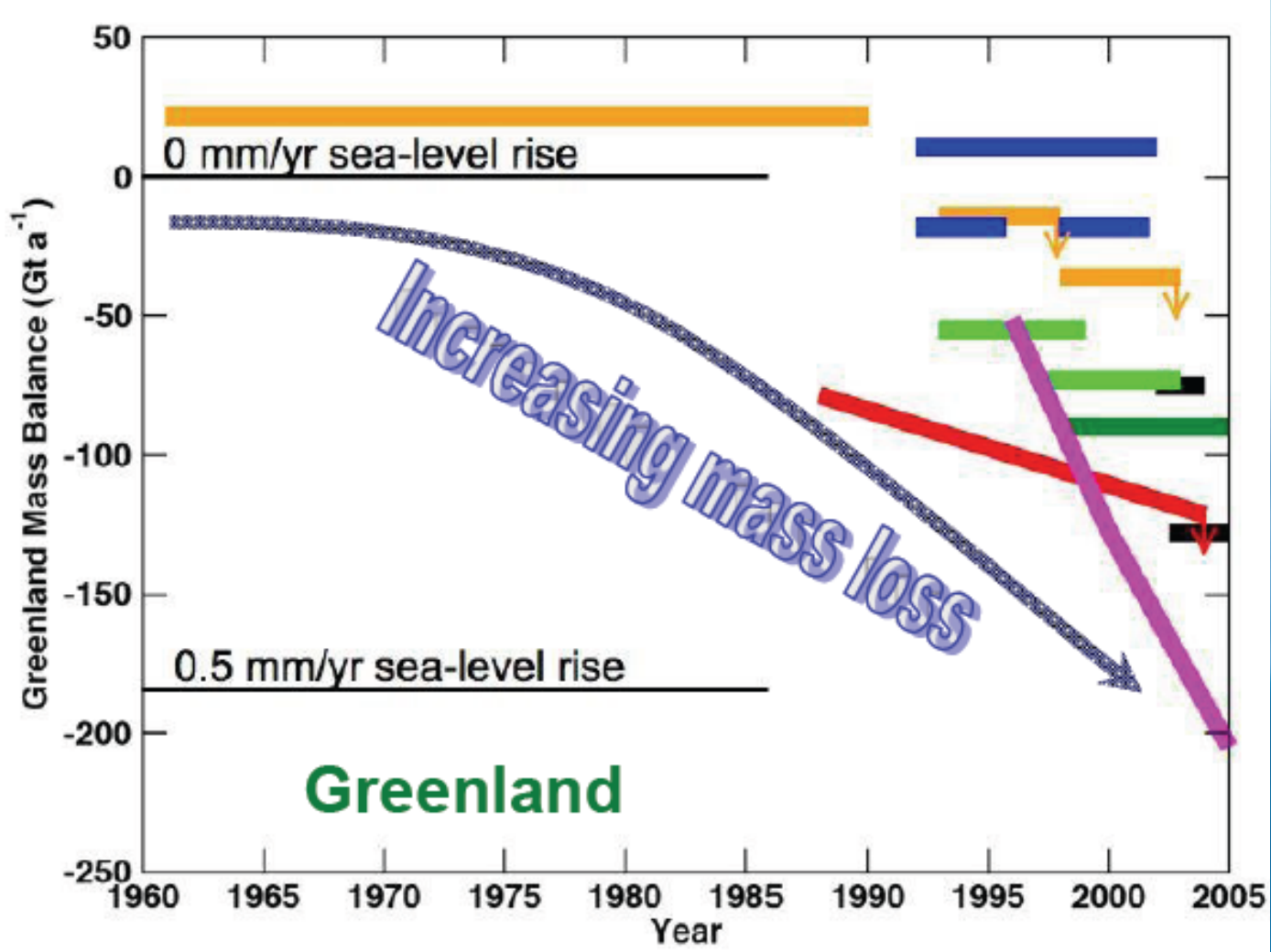
Dla statystyków

Study	Survey period	Survey area 10 ⁶ km ² (%)	EAIS MB Gt year ⁻¹	WAIS MB Gt year ⁻¹	AIS MB Gt year ⁻¹	GIS MB Gt year ⁻¹
Wingham <i>et al.</i> (7)*	1992–1996	7.6 (54)	−1 ± 53	−59 ± 50	−60 ± 76	
Krabill <i>et al.</i> (8)*	1993–1999	1.7 (12)				−47
Rignot and Thomas (9)†	1995–2000	7.2 (51)	22 ± 23	−48 ± 14	−26 ± 37	
Davis and Li (17)*	1992–2002	8.5 (60)			42 ± 23	
Davis <i>et al.</i> (10)*	1992–2003	7.1 (50)	45 ± 7			
Velicogna and Wahr (11)‡	2002–2004	1.7 (12)				−75 ± 21
Zwally <i>et al.</i> (18)*	1992–2002	11.1 (77)	16 ± 11	−47 ± 4	−31 ± 12	11 ± 3
	1996					−83 ± 28
Rignot and Kanagaratnam (12)†	2000	1.2 (9)				−127 ± 28
	2005					−205 ± 38
Velicogna and Wahr (20)‡	2002–2005	12.4 (88)	0 ± 51	−136 ± 19	−139 ± 73	
Ramillien <i>et al.</i> (19)‡	2002–2005	14.1 (100)	67 ± 28	−107 ± 23	−129 ± 15	−169 ± 66
Wingham <i>et al.</i> (14)*	1992–2003	8.5 (60)			27 ± 29	
Velicogna and Wahr (13)‡	2002–2006	1.7 (12)				−227 ± 33
Chen <i>et al.</i> (15)‡	2002–2005	1.7 (12)				−219 ± 21
Luthcke <i>et al.</i> (16)‡	2003–2005	1.7 (12)				−101 ± 16
Range			−1 to 67	−136 to −47	−139 to 42	−227 to 11

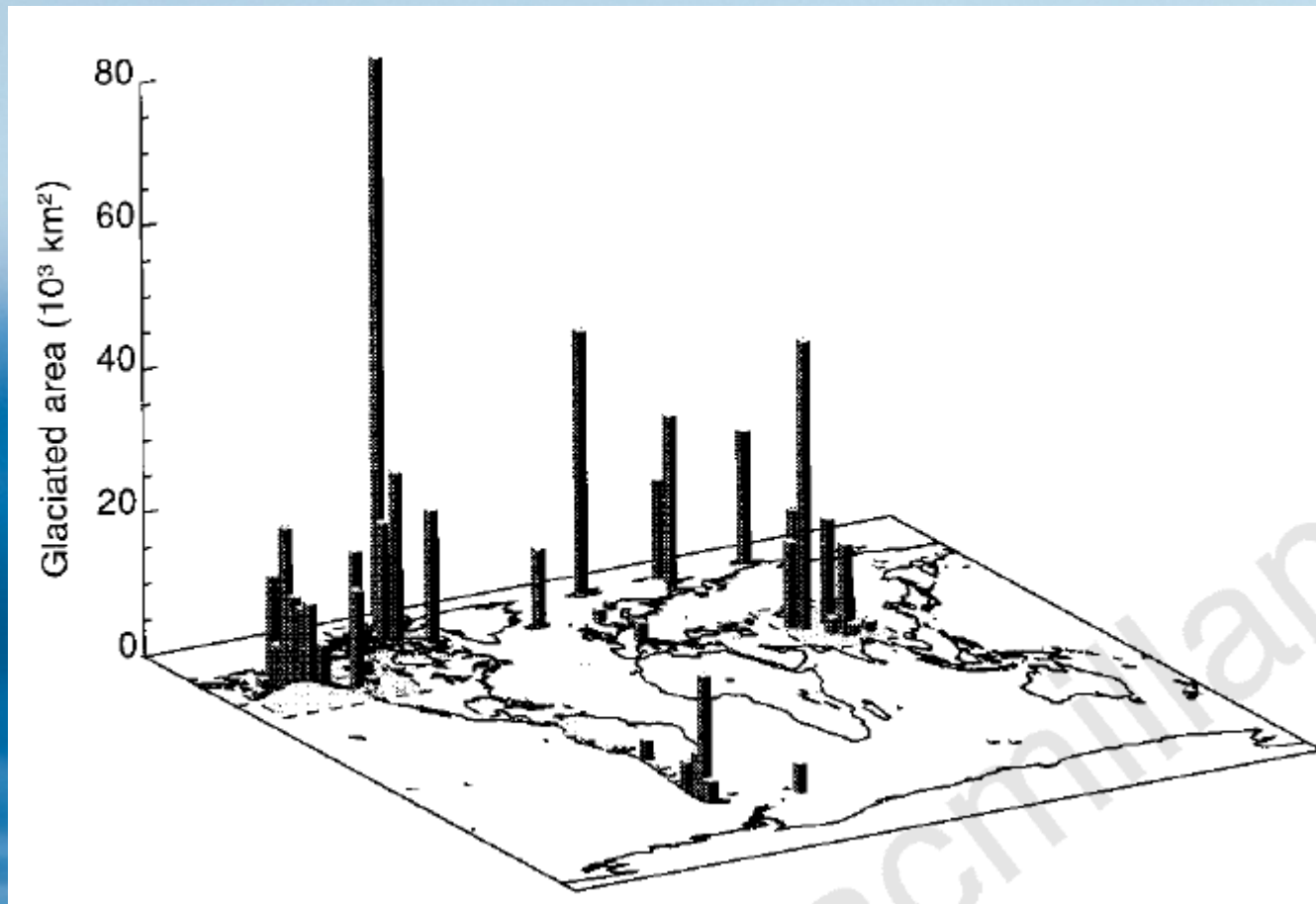
*Altimetry. †InSAR mass budget. ‡Gravimetry.

Podsumowanie bilansów dla Wschodniej Antarktydy (EAIS), Zachodniej Antarktydy (WAIS), całej Antarktydy (AIS) i Grenlandii (GIS).

Recently published or reported estimates of ice-sheet behavior (solid bars) for different time intervals, indicating increase in mass loss.

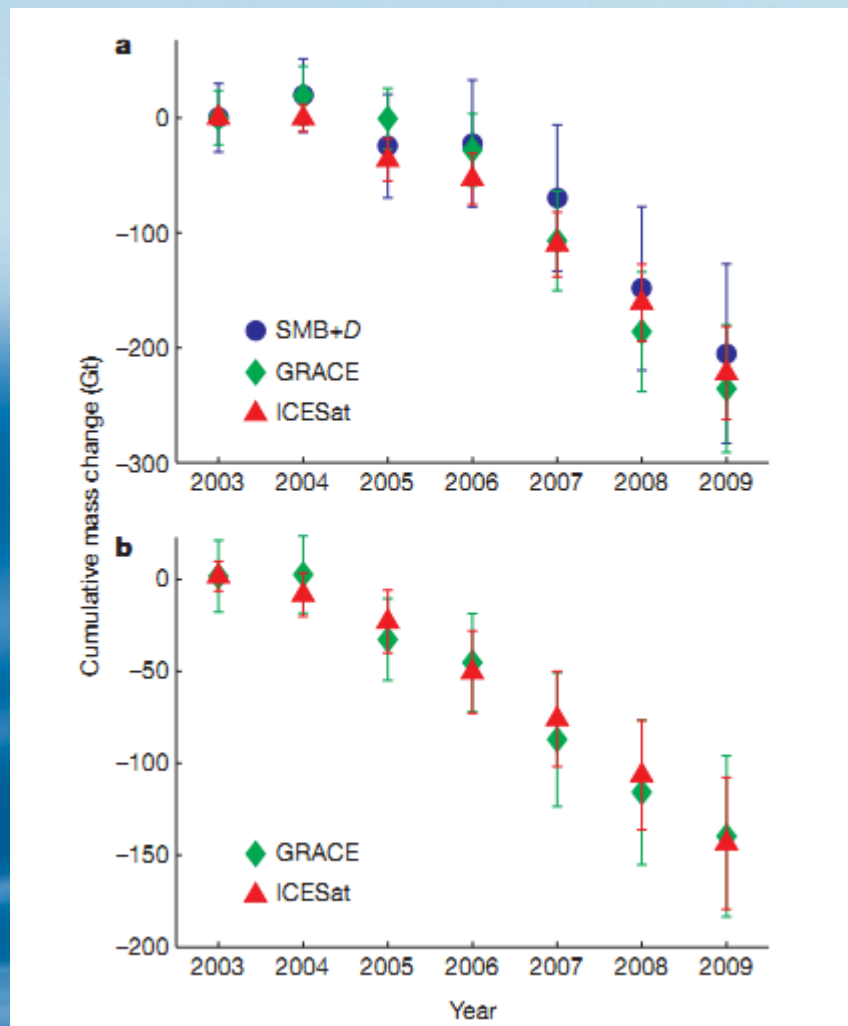
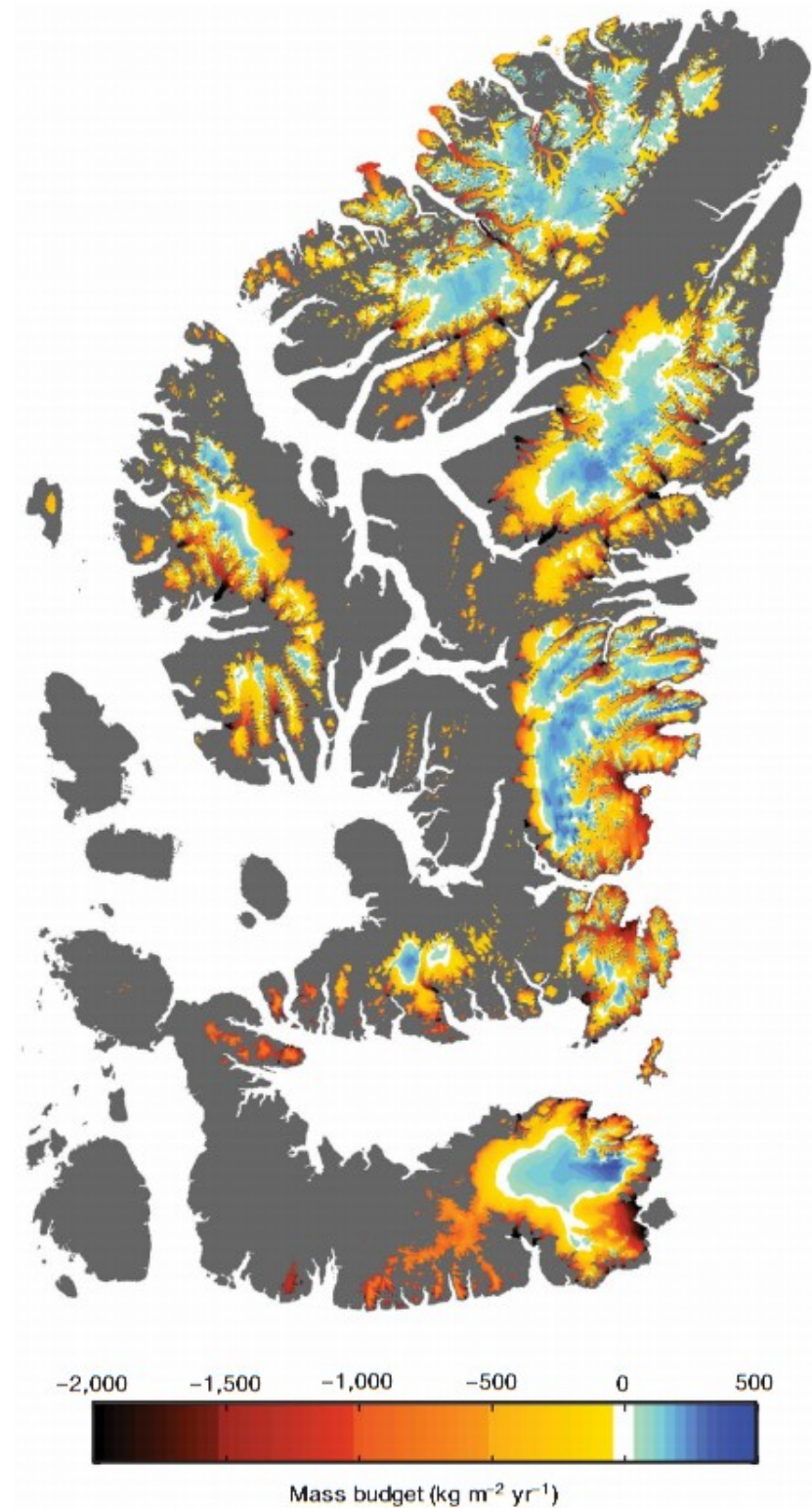


Inne lodowce



Lodowce Kanady, Alaski, Spitsbergenu i górskie wg. IPCC AR5 (2013) przyczyniają się do powiększenia poziomu oceanu światowego o 0.76 ± 0.39 mm/rok (z całkowitego przyrostu 3.2 ± 0.4 mm/rok). Rozszerzalność termiczna oceanów powoduje wzrost o ok. 1.1 ± 0.3 mm/rok. Reszta to (szybko zwiększające się) topienie lądolodów Antarktydy Zachodniej i Grenlandii.

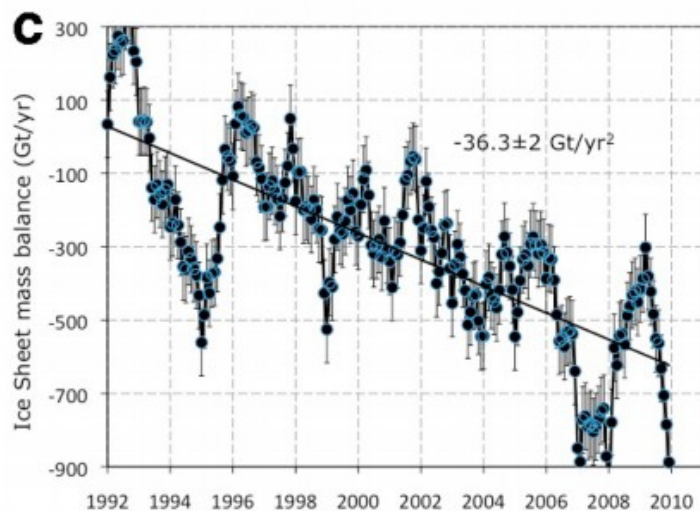
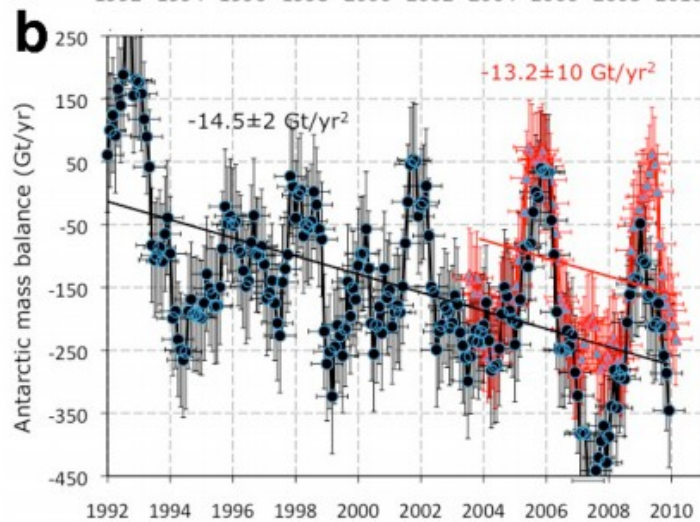
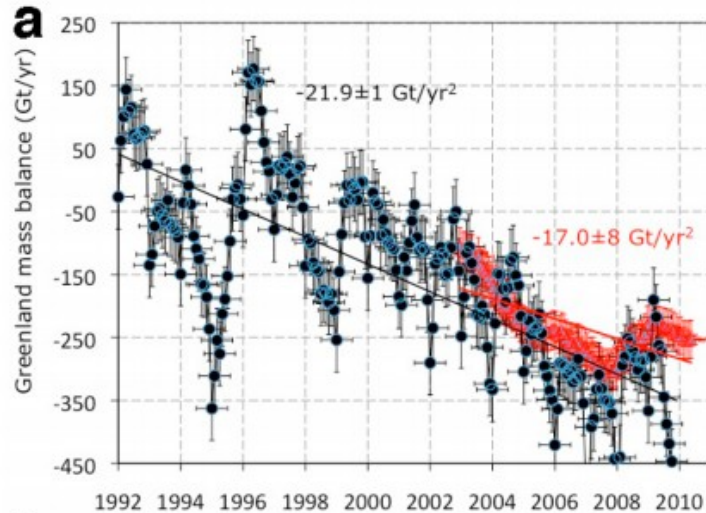
Inne lodowce: przykład



Lodowce Archipelagu Kanadyjskiego tracą (powyżej) coraz szybciej masę i w północnej (a) i w południowej części. Bilans masy północnej części (Wyspa Ellesmere i okolice) od jesieni 2003 do jesieni 2009 po lewej.

Gardner et al 2011 (Nature)

I jeszcze jedno memento

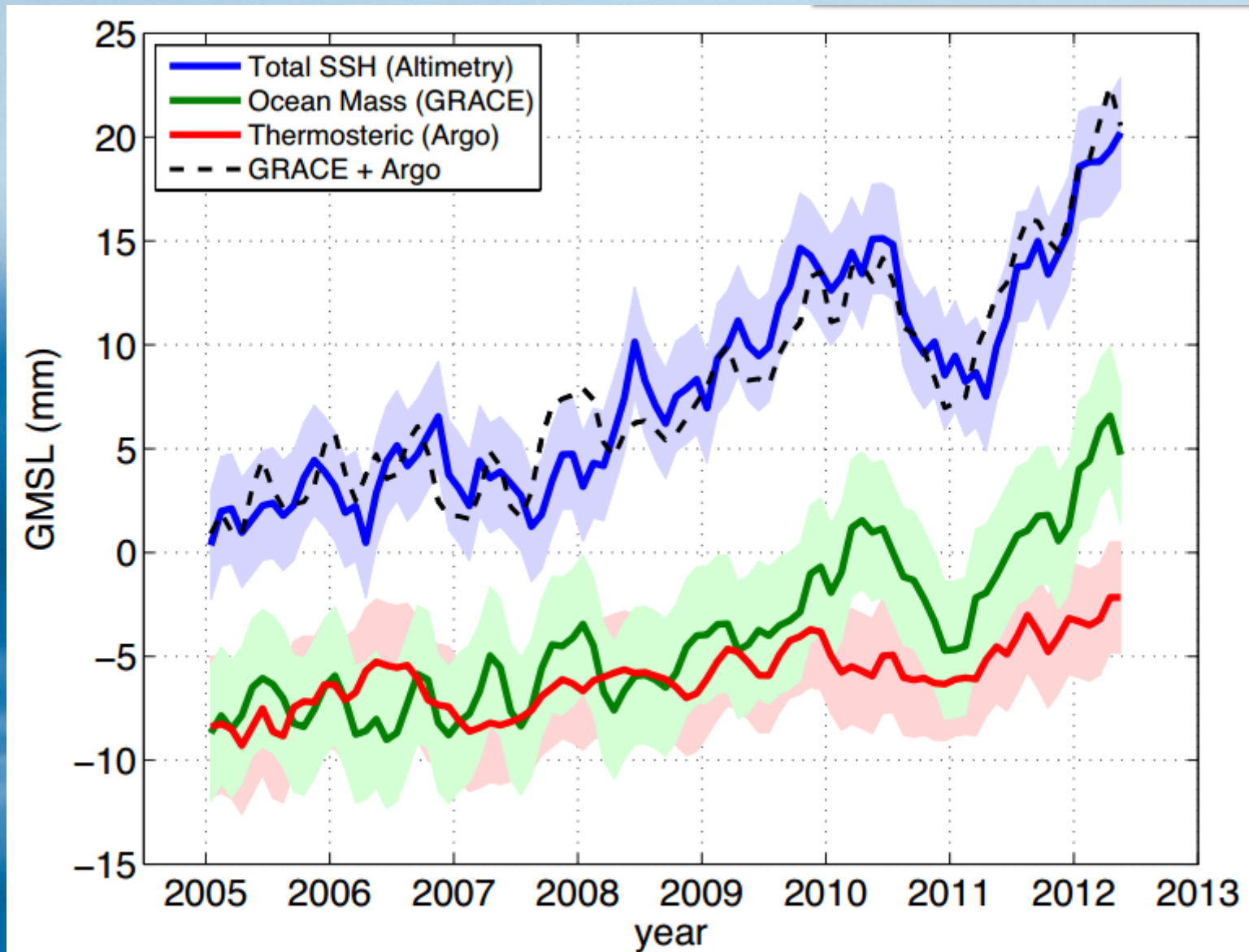


Wykresy pokazują zmiany tempa rocznego ubywania masy (dM/dt) dla Grenlandii (1), Antarktydy (b) i obu tych lądów łącznie (c).

Czerwone linie to pomiary grawitacyjne a czarne bilans masy.

Uwaga: dM/dt to nie anomalia masy ale prędkości jej ubywania. Zatem malejące trendy oznaczają, że nie dość, że mamy ubywa ale ubywa jej coraz szybciej (w tempie jednostajnie przyśpieszonym czyli w przybliżeniu ze stałym przyspieszeniem).

Zgodność niezależnych pomiarów



Dodanie wartości (czarna przerywana) masy wody w oceanie (misja GRACE) i wzrostu objętości oceanu w wyniku rozszerzalności cieplnej (ARGO) zgadza się z pomiarami globalnego poziomu morza przy pomocy altymetrii satelitarnej (niebieska).

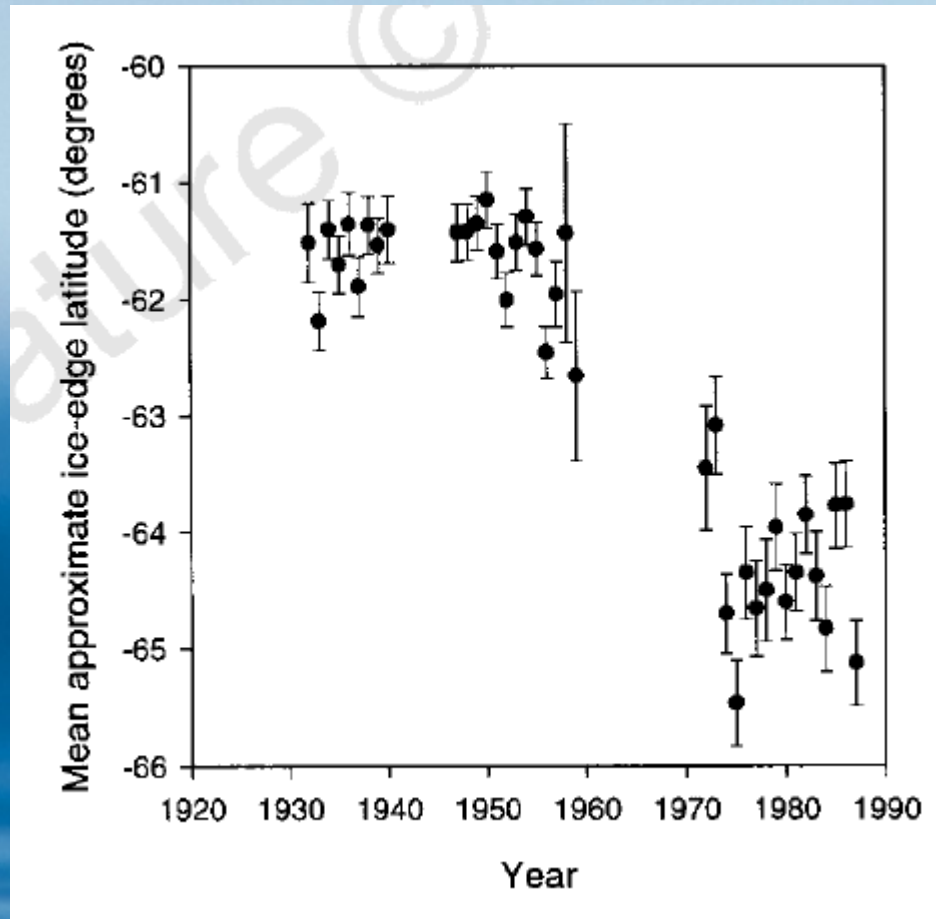
Podsumowanie 2/3

- Grenlandia w czasie poprzedniego interglacjału była częściowo pozbawiona lodu. Ogrzanie jej średnioroczne o 3°C wystarczy do jej stopienia, zajmie to jednak ponad 1000 lat. Poziom oceanów podniesie się przez to o ok. 7 m.
- W ostatnich latach powierzchnia lodu poniżej 2000 m coraz szybciej topnieje powodując równocześnie szybsze spływanie strumieni lodowych do morza.
- Powyżej 2000 m zwiększona ilość opadów powoduje akumulację masy ale granica równowagi podnosi się.
- Całkowity bilans masy Grenlandii mierzony grawitacyjnie jest ujemny i daje ponad 0.5 mm/rok wzrostu poziomu morza. Trend ten pogłębia się.



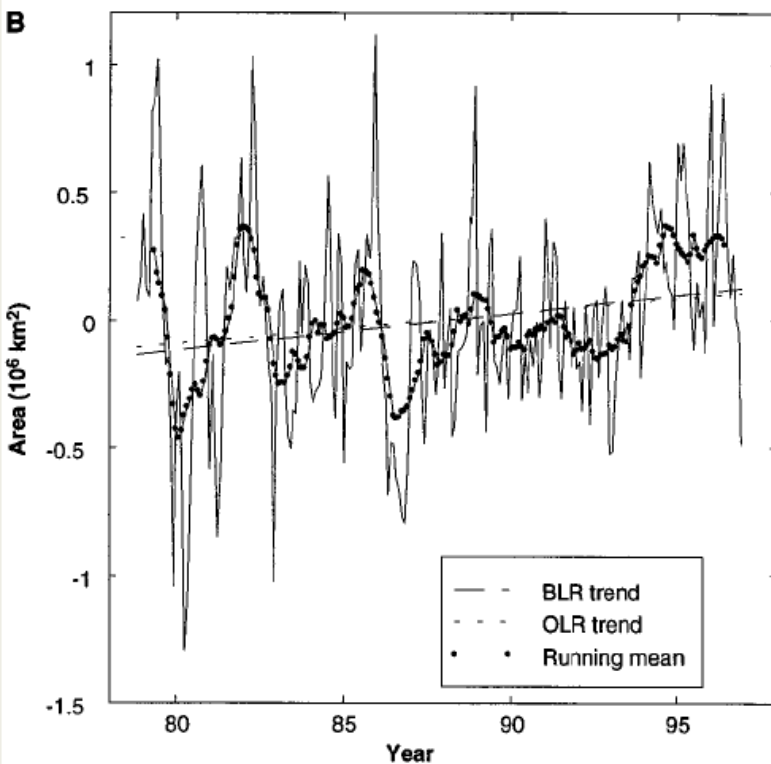
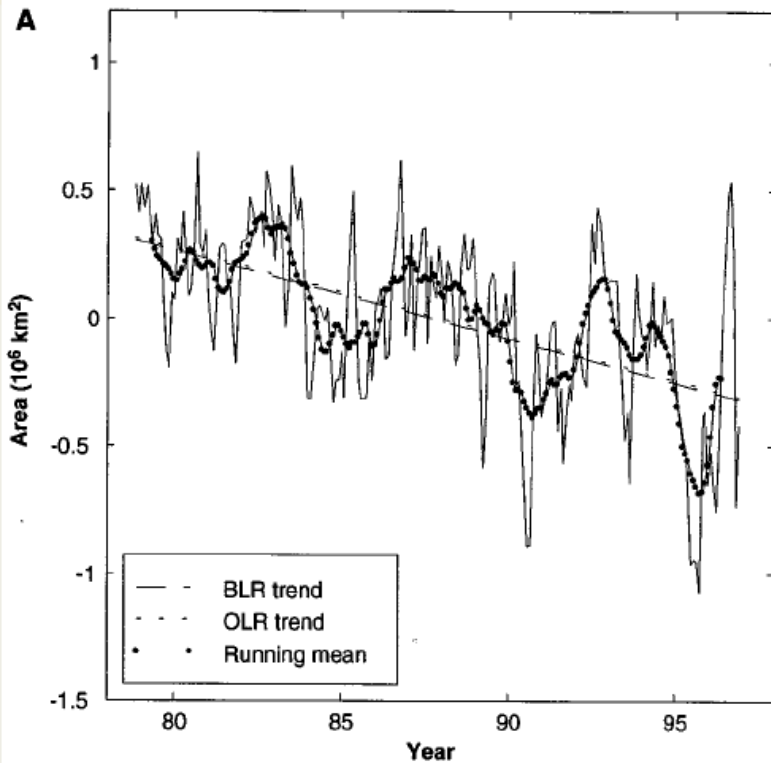
*Woda z topiącej się powierzchni lodowca smarem, który przyspiesza jego ruch
(Zwally 2002 – okładka Science)*

Wkład wielorybników w oceanografię polarną



Analiza bazy danych dzienników wielorybnych z lat 1931-1987 wskazuje na przesunięcie na południe (cofnięcie się) granicy antarktycznych lodów morskich o ok. 3 stopnie w połowie XX wieku.

Asymetria zmian pokrycia lodem mórz Arktycznych i Antarktycznych

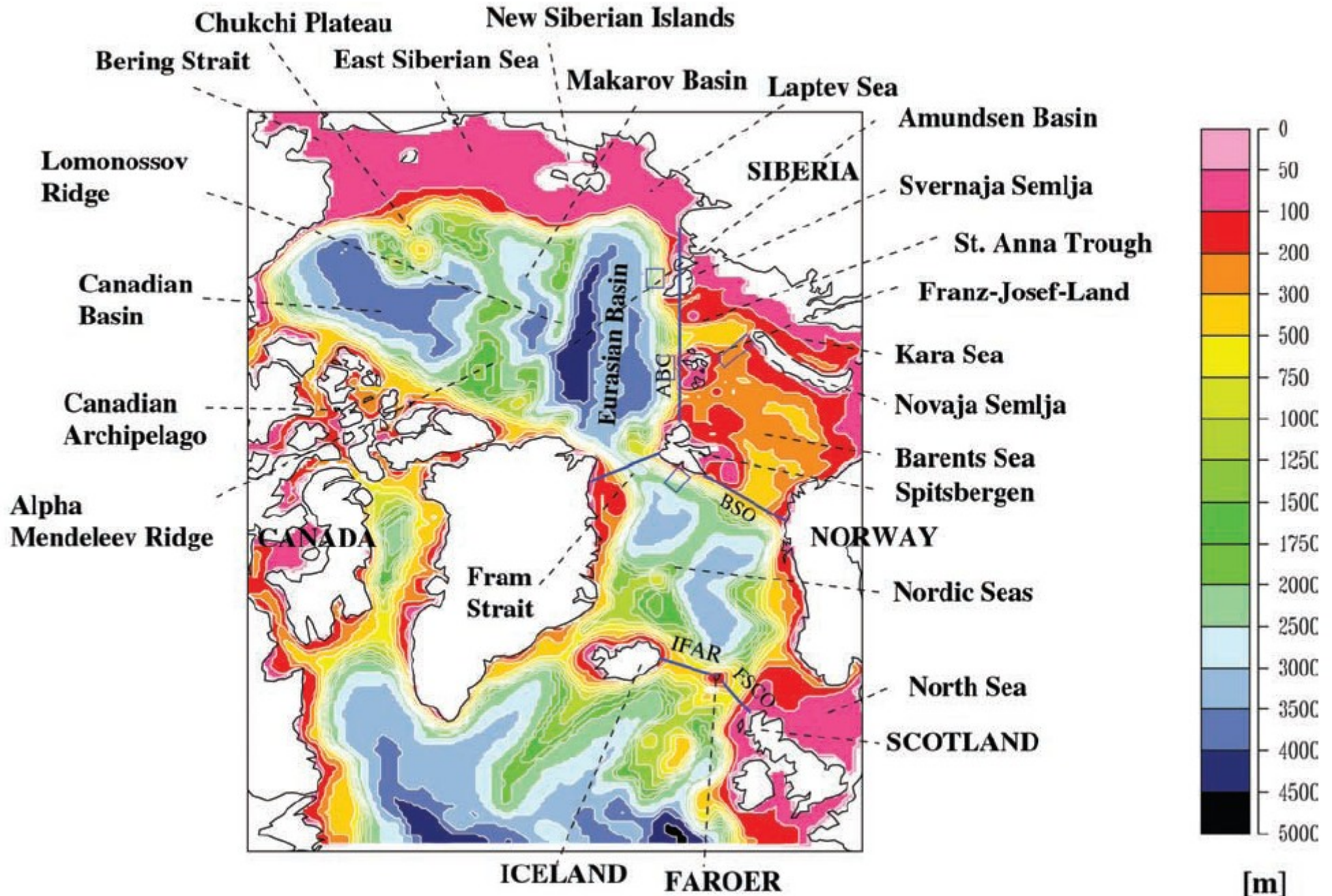


Od roku ok. 1980 obserwuje się
przeciwstawne trendy pokrycia oceanu
lodem:

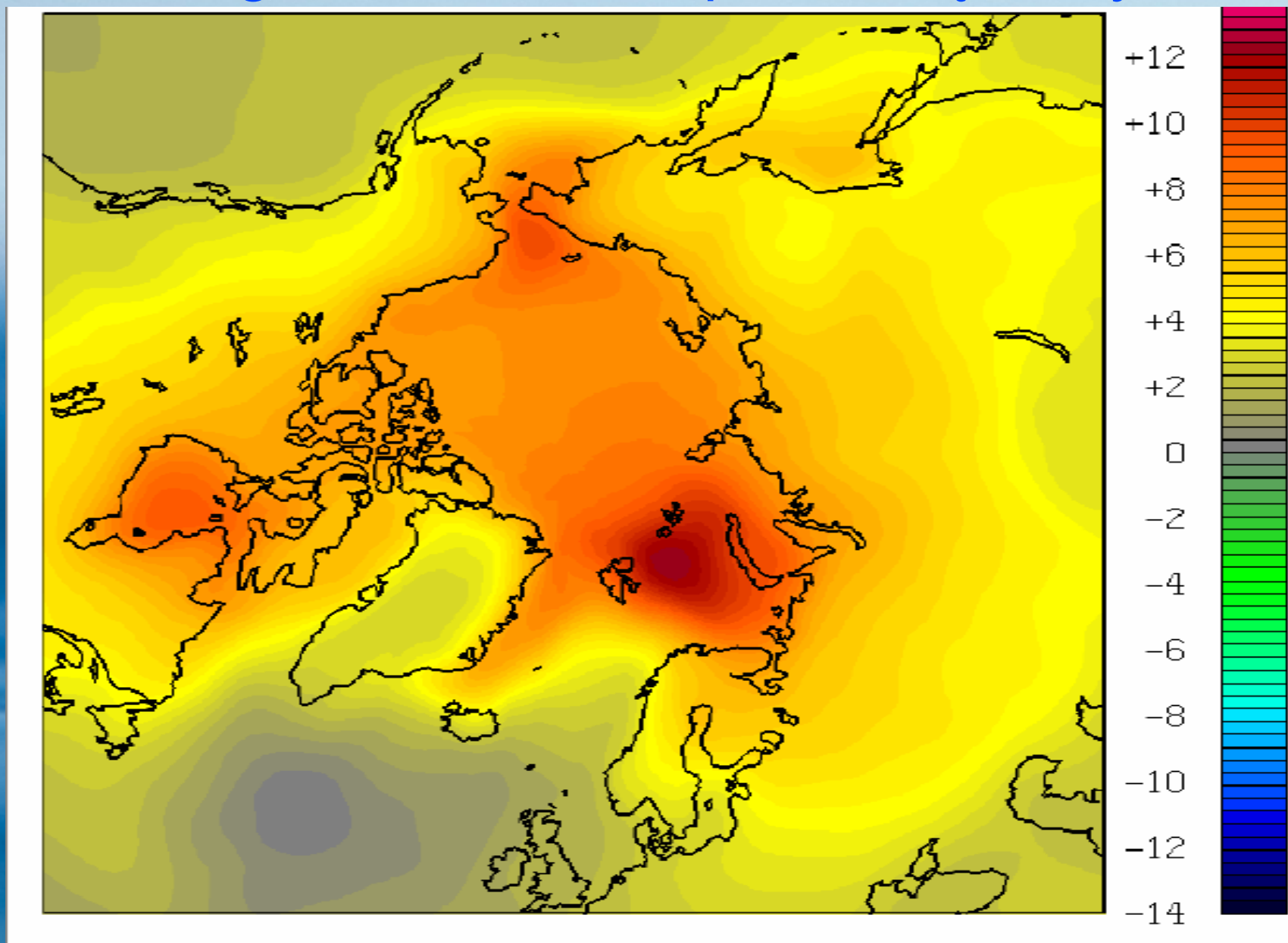
- malejący trend w Arktyce (na górze)
- rosnący trend w Antarktyce (na dole)

Niesymetryczne zmiany między tymi
obszarami związane są zwykle ze zmianą
proporcji wody głębinowej (cyrkulacja
termohalinowa) produkowanej na Północy
oraz na Południu. Czy tak jest i tym razem?

Morza Arktyczne



Prognozowane ocieplenie się Arktyki



Średnia zmiana zimowej (DJF) temperatury Arktyki między latami 1980-1999 a 2070-2089 w scenariuszu B1 (14 modeli klimatycznych)

Walsh 2006 (IARC overview) after IPCC

Obudzenie się Arktyki

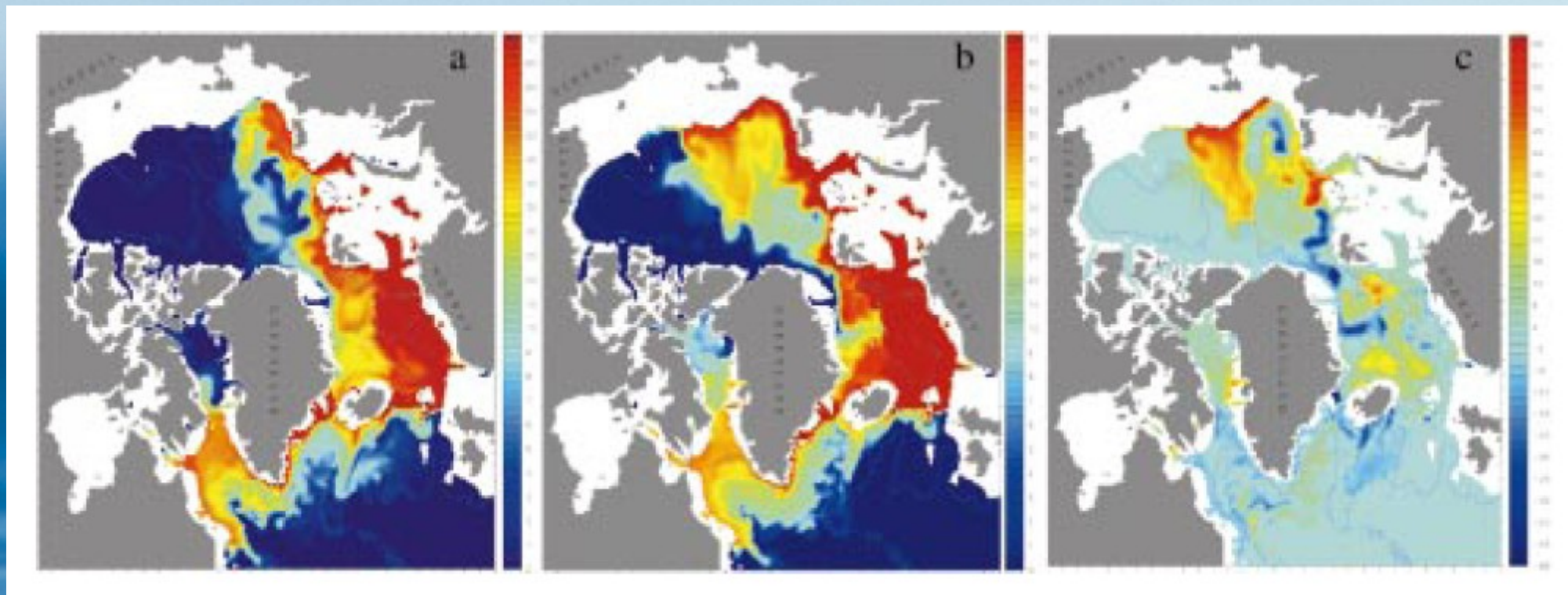


Changing waters of the Arctic Ocean. White areas show permanent pack-ice. A warming by 0.5 to 1 °C of the Atlantic inflow has been seen along basin margins at depths of 200 to 800 m. This warming has penetrated across the Lomonosov ridge and into the Makarov and Canada basins. Also, the front separating the domains of Pacific and Atlantic influence traditionally found near the Lomonosov ridge now appears aligned with the Alpha-Mendeleev ridge. How might these changes have affected the exit of fresh water from the Arctic?

Początek zauważania zmian w Arktyce – rok 1996.

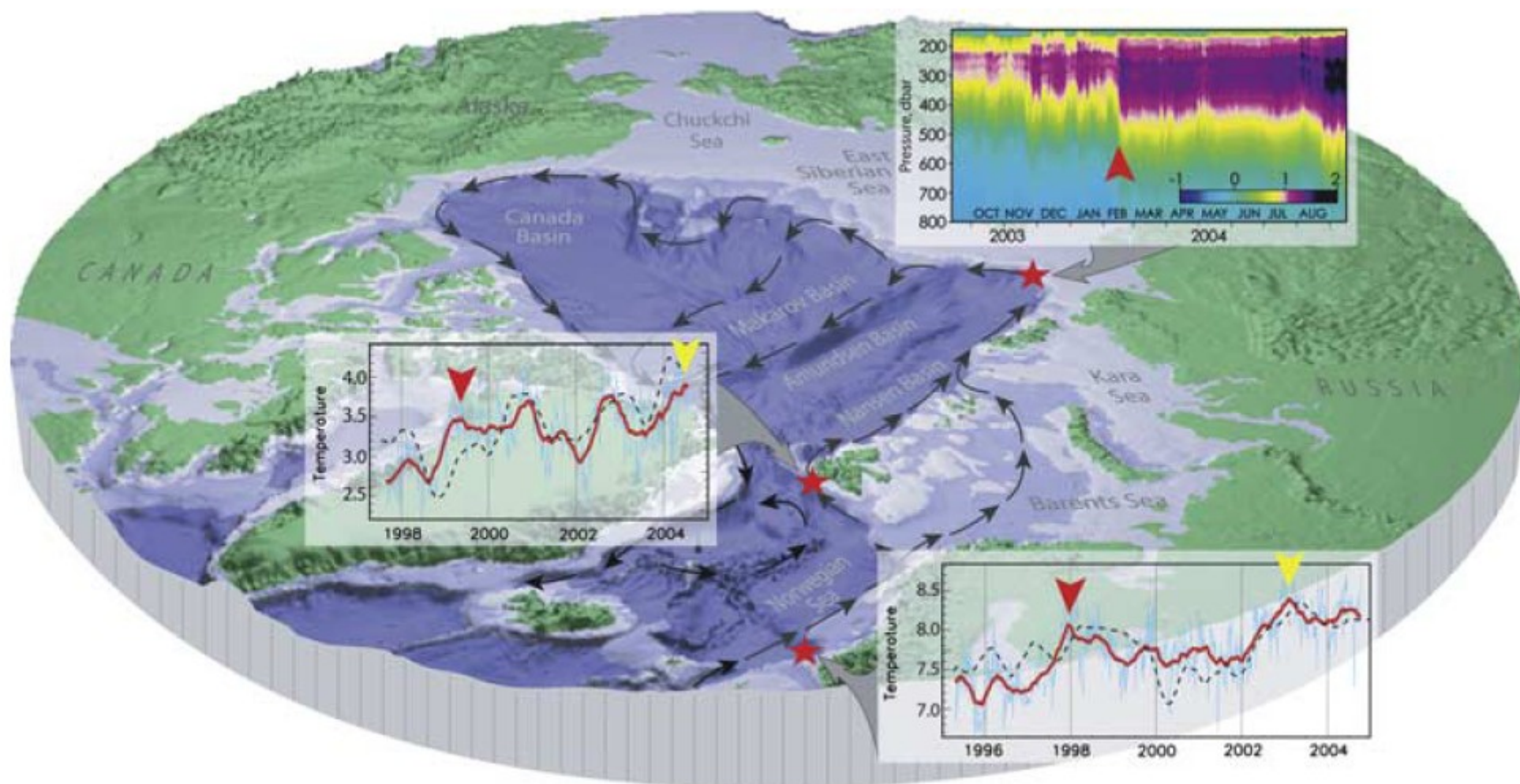
Macdonald 1996 (Nature)

Wlew wody atlantyckiej do Oceanu Arktycznego



Wyniki modelowania wlew wód atlantyckich dla roku 1979 i 1993 (oraz różnica wyników) modelem Naval Postgraduate School z Monterey (Kalifornia).

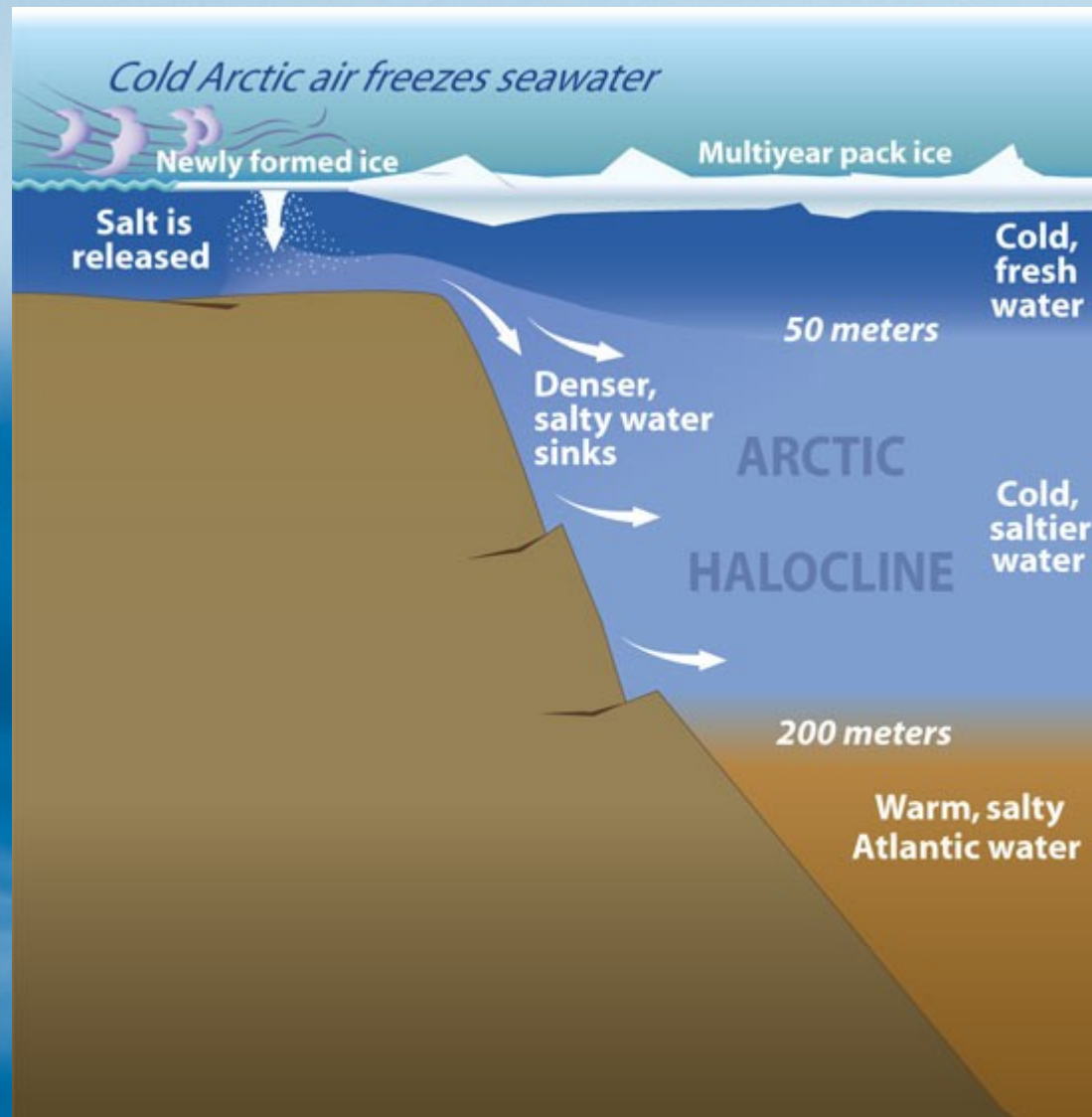
Napełnianie Oceanu Arktycznego ciepłą wodą



Przemieszczanie się “sygnału” atlantyckiego w głąb Arktyki –
wyniki pomiarów (czerwone) i modelu (przerywana linia).
Kolory znaczników oznaczają ten sam impuls ciepła.

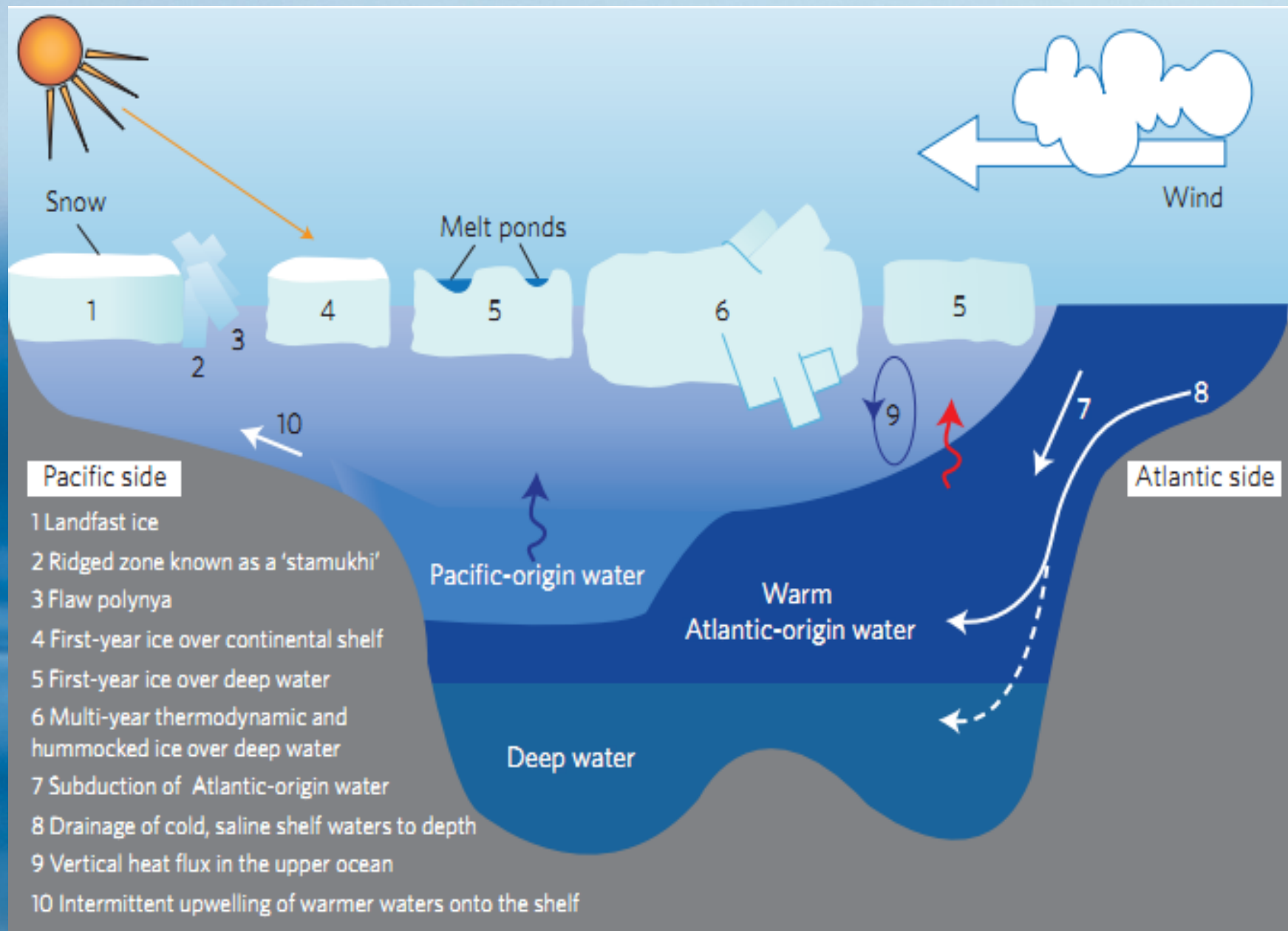
(Polyakov i inni, 2005)

Arktyczna haloklina

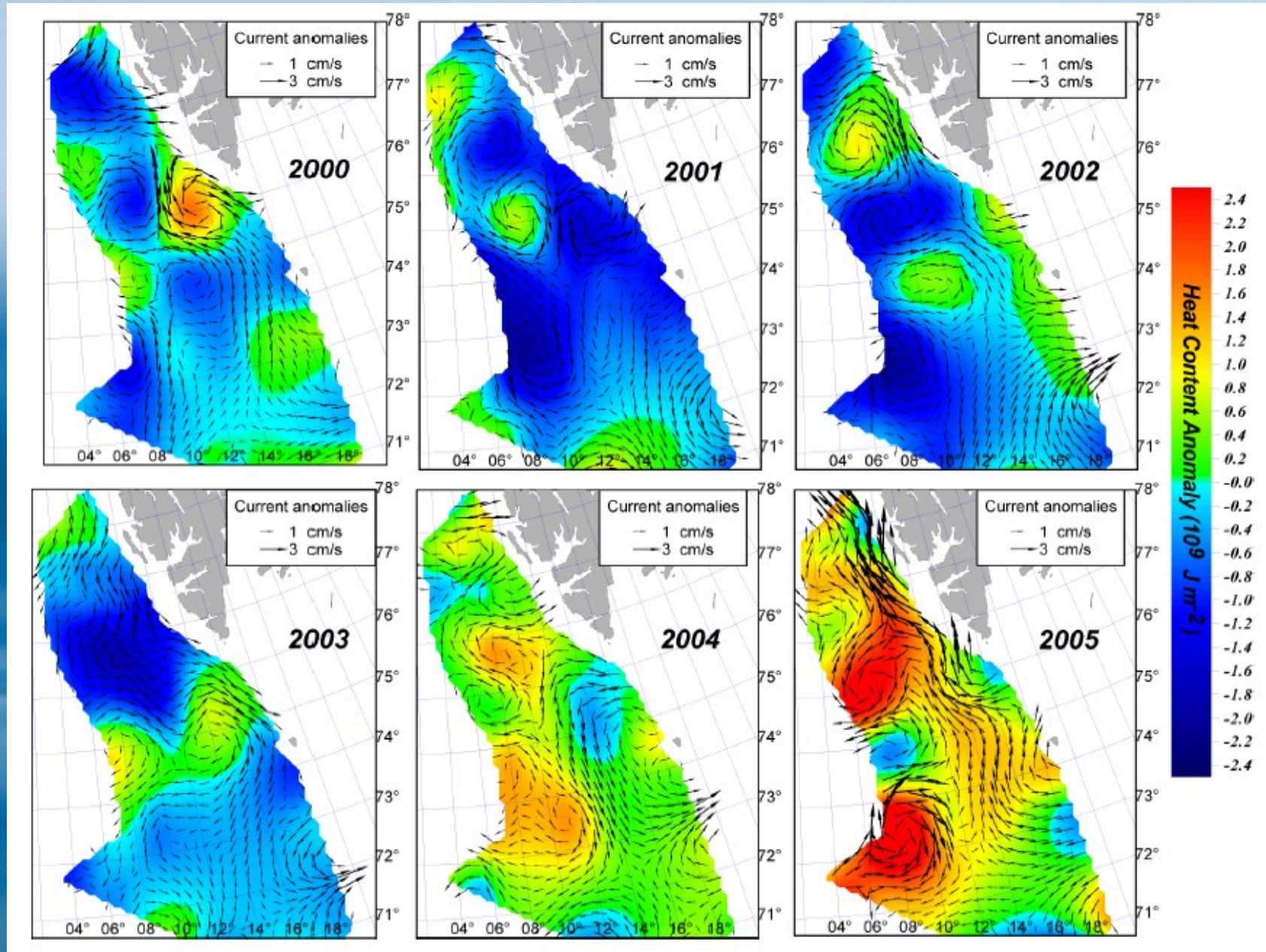


Arktyczna (lub “zimna”) haloklina to warstwa zimnej i słodkiej wody nad ciepłą ale słoną wodą atlantycką (bardziej poprawnie nazwa powinna oznaczać ich granicę). Zimna powierzchniowa woda pochodzi z rzek Syberii i z topienia lodu morskiego (który przy zamarzaniu wyrzuca słoną wodę).

Procesy fizyczne związane z lodem arktycznym



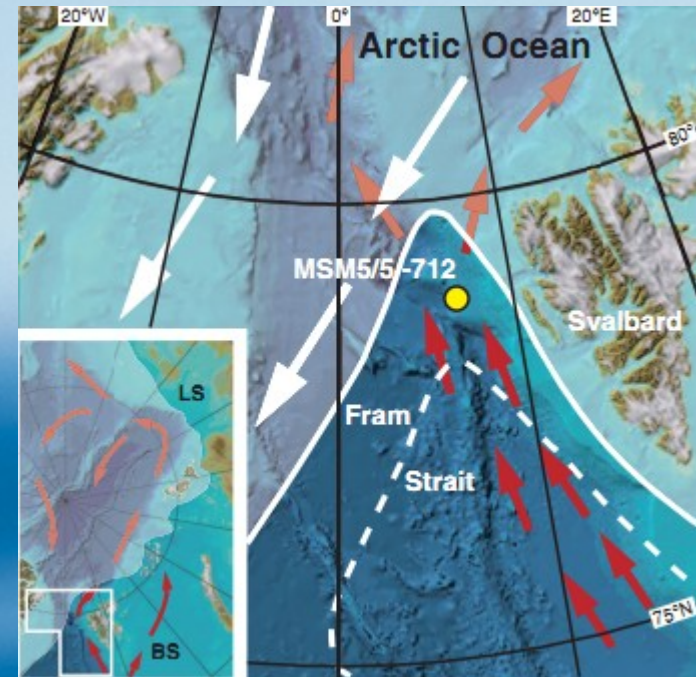
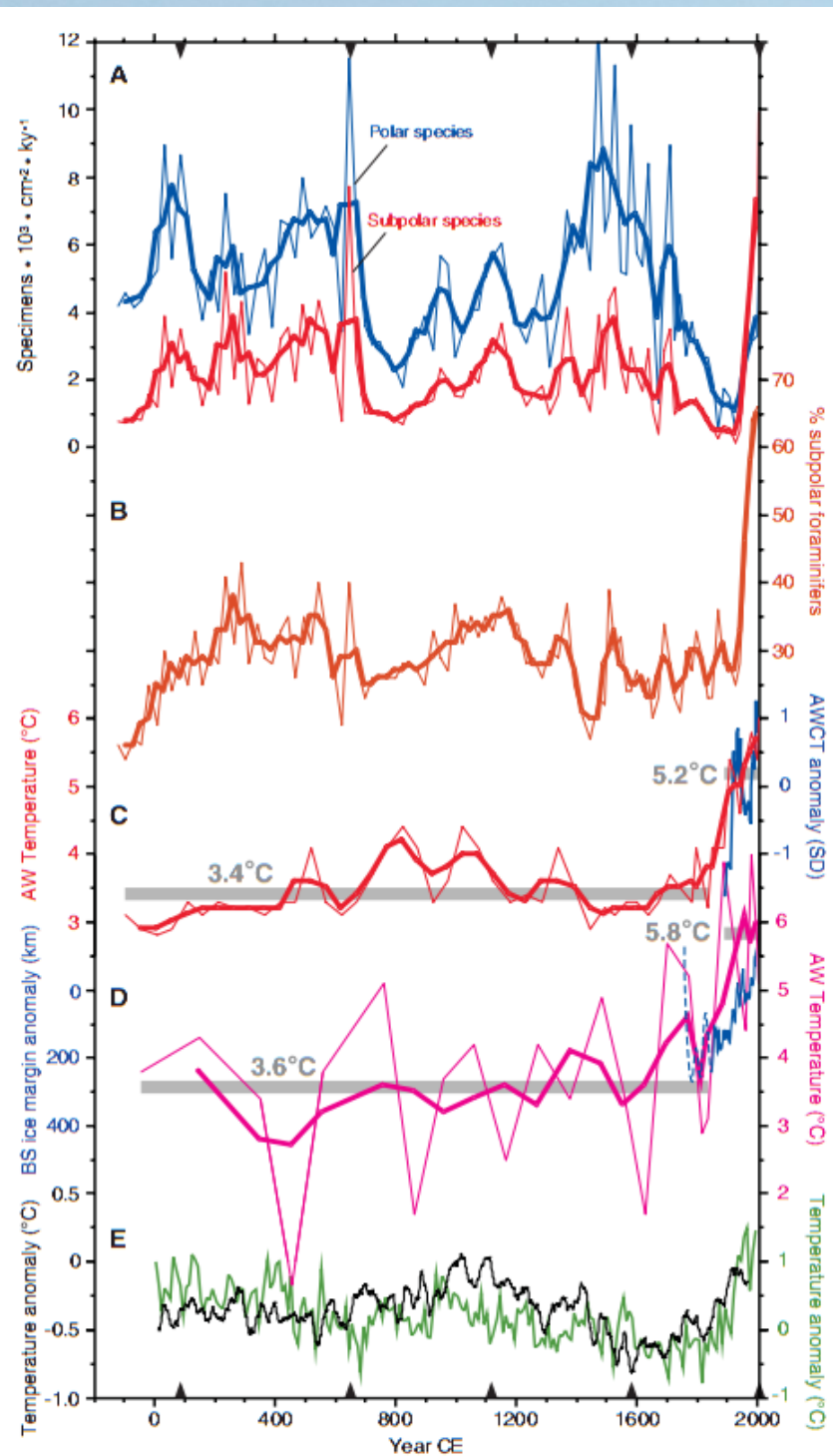
W drodze do Oceanu Arktycznego



Anomalia ciepła i prędkości Wód Atlantycznych na głębokości 100 m.

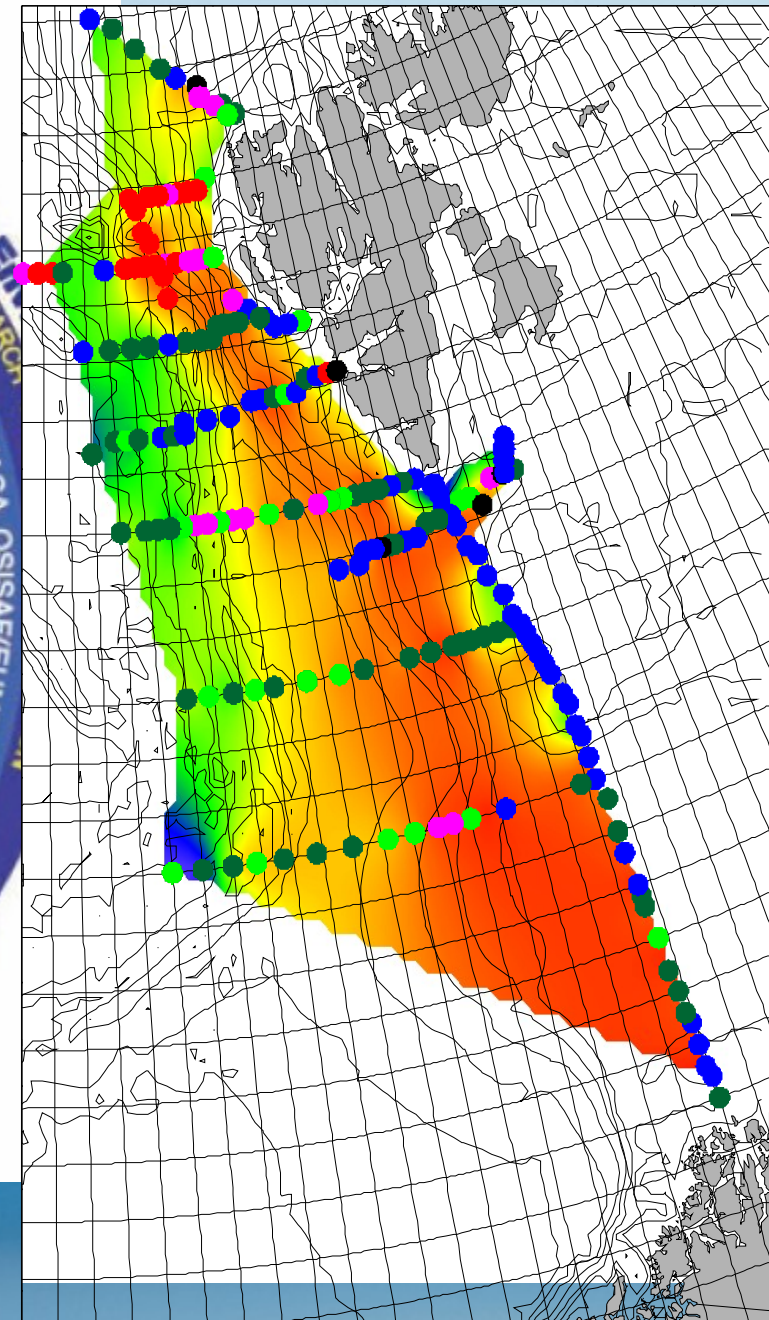
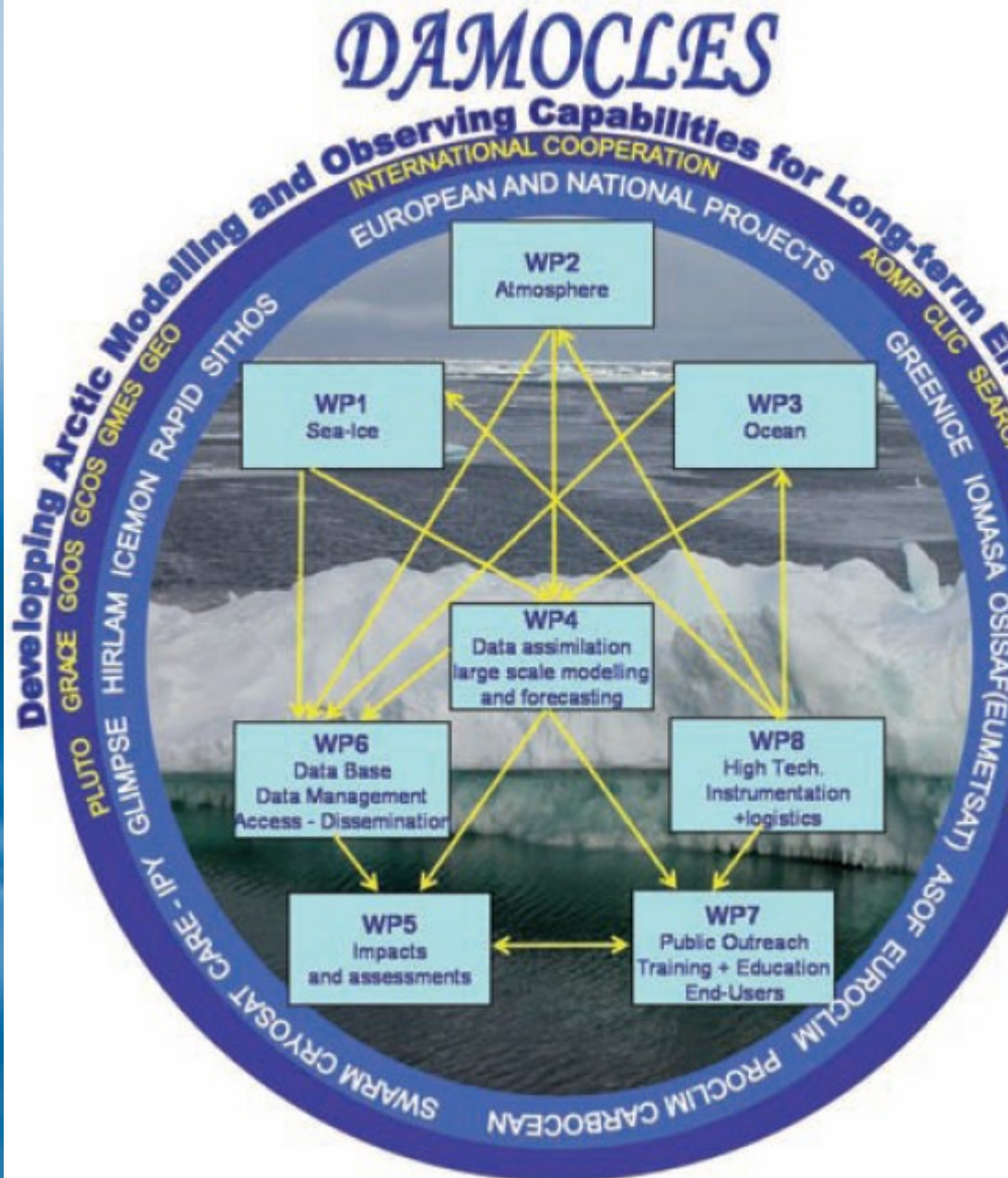
Walczowski i Piechura, 2006 (Geophysical Research Letters)

W drodze do Oceanu Arktycznego: dłuższe spojrzenie



Badania paleoklimatyczne rdzenia pobranego na zachód od Svalbardu pokazują bezprecedensowy wzrost temperatury wód atlantyckich dopływających do Arktyki: A) występowanie gatunków polarnych i subpolarnych otwornic, B) procent subpolarnych, C i D) dwie rekonstrukcje letnich temperatur powierzchniowych, E) anomalia temperatur lądu w Arktyce (dla porównania)

Spielhagen et al 2011 (Science)

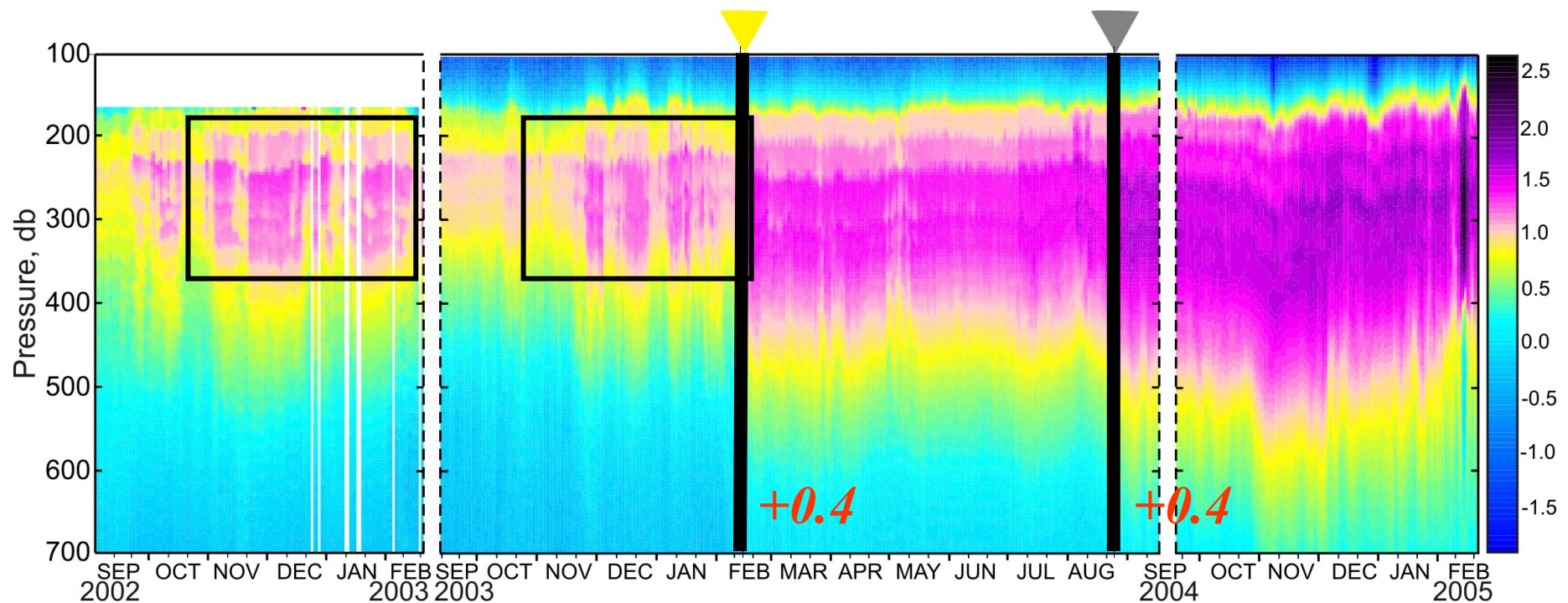


Rejs *Kapitana Dranicyna*, lato 2006



RESULTS from M1 Mooring

Three-year long temperature record from M1 mooring



Exceptionally strong warming in the Atlantic Water layer has been recorded since February 2003



NABOS 2006 Expedition

Arctic Expedition for K-12 Teachers

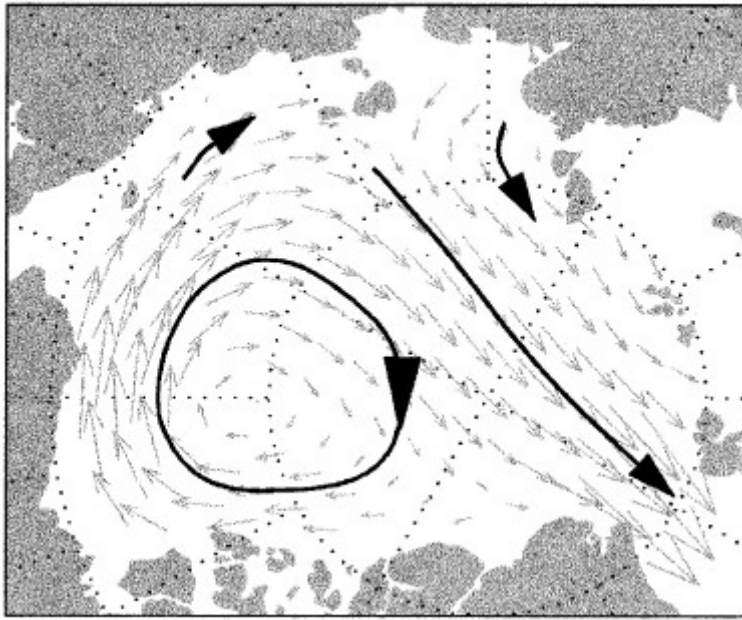
Lód Arktyczny i indeks NAO

Zmiany pokrycia lodem wiążano do niedawna głównie z wartością indeksu AO (lub ściślej z nim skorelowanym NAO). Po lewej cyrkulacja lodu przy ujemnej i dodatniej wartości AO. Po prawej droga lodu i lata istnienia.

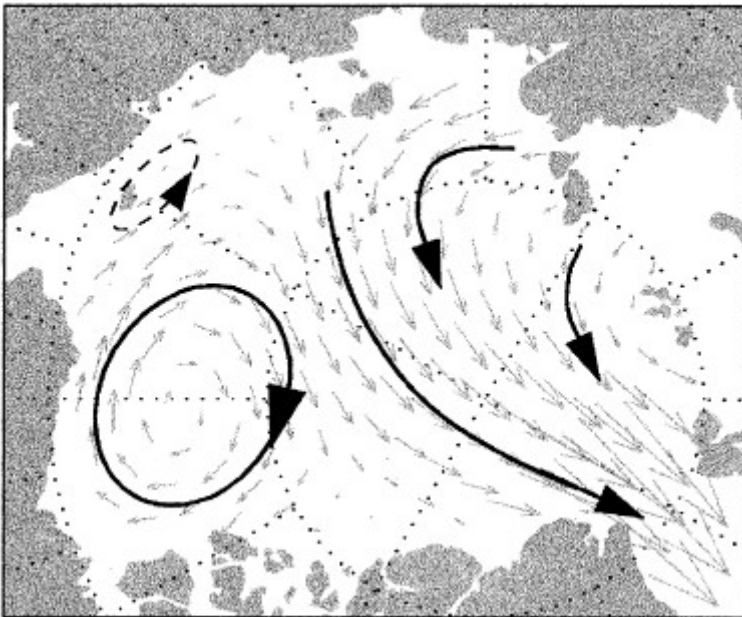
Dodatnie AO powoduje szybszy wypływ lodu przez Cieśninę Framma.

Ostatnio oprócz AO zaczęto używać nazwy NAM (Northern Annual Mode)

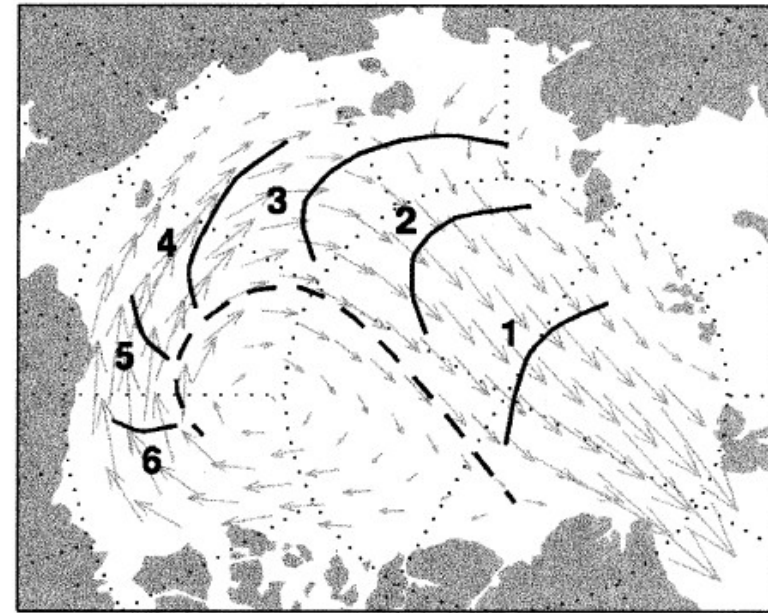
(c) Low Index



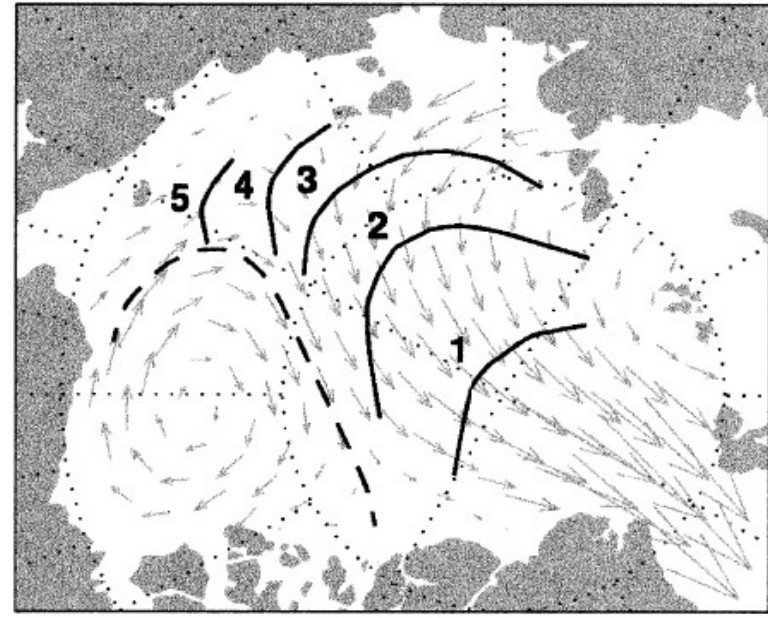
(d) High Index



(a) Low Index



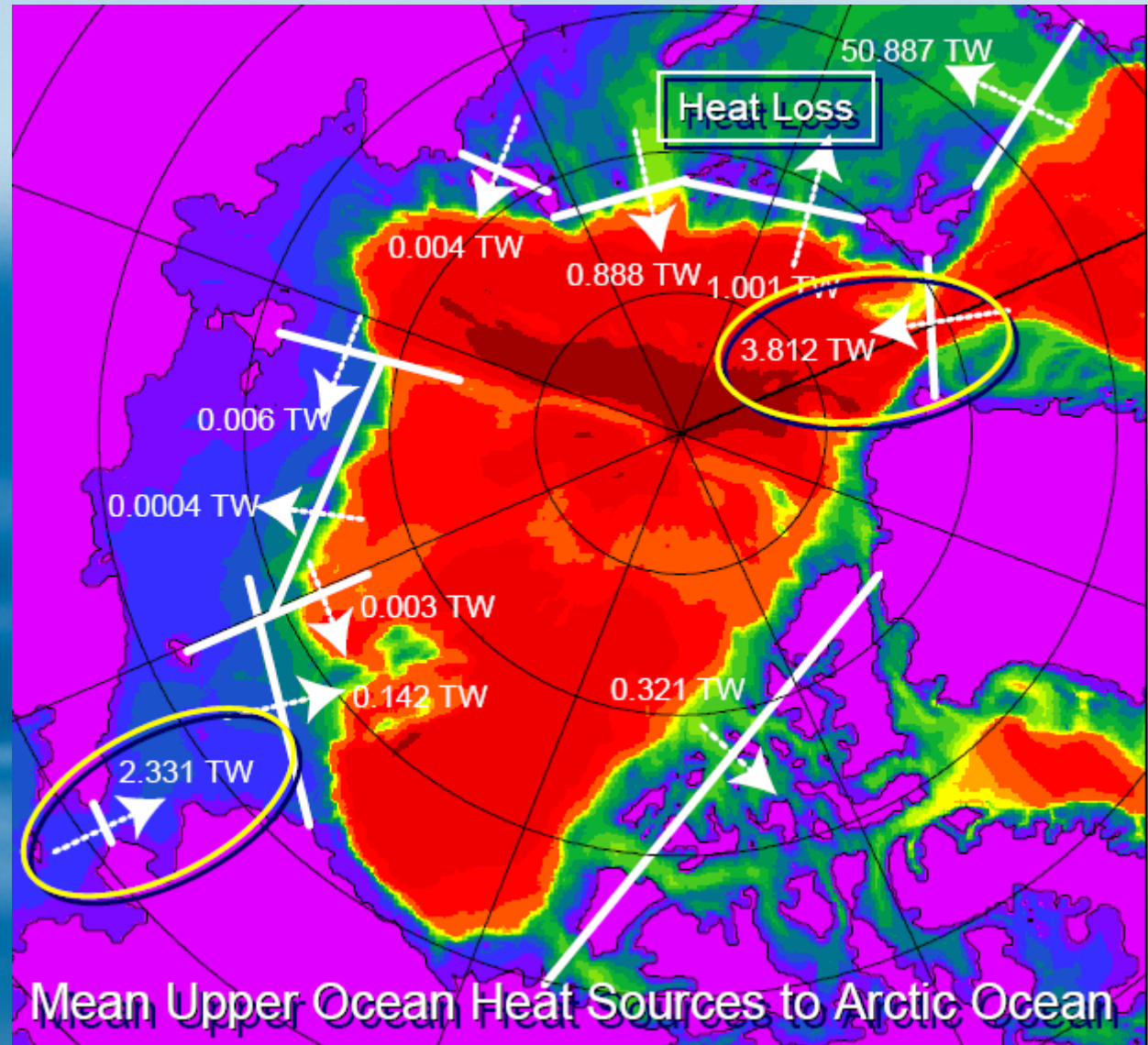
(b) High Index



Dopływ ciepła do Arktyki

W ostatnich latach korelacja topienia lodu z indeksem NAO/AO zerwała się. Zaczęto zwracać większą uwagę na dopływ ciepła w wodach powierzchniowych (ponad halokliną) do Arktyki (po prawej).

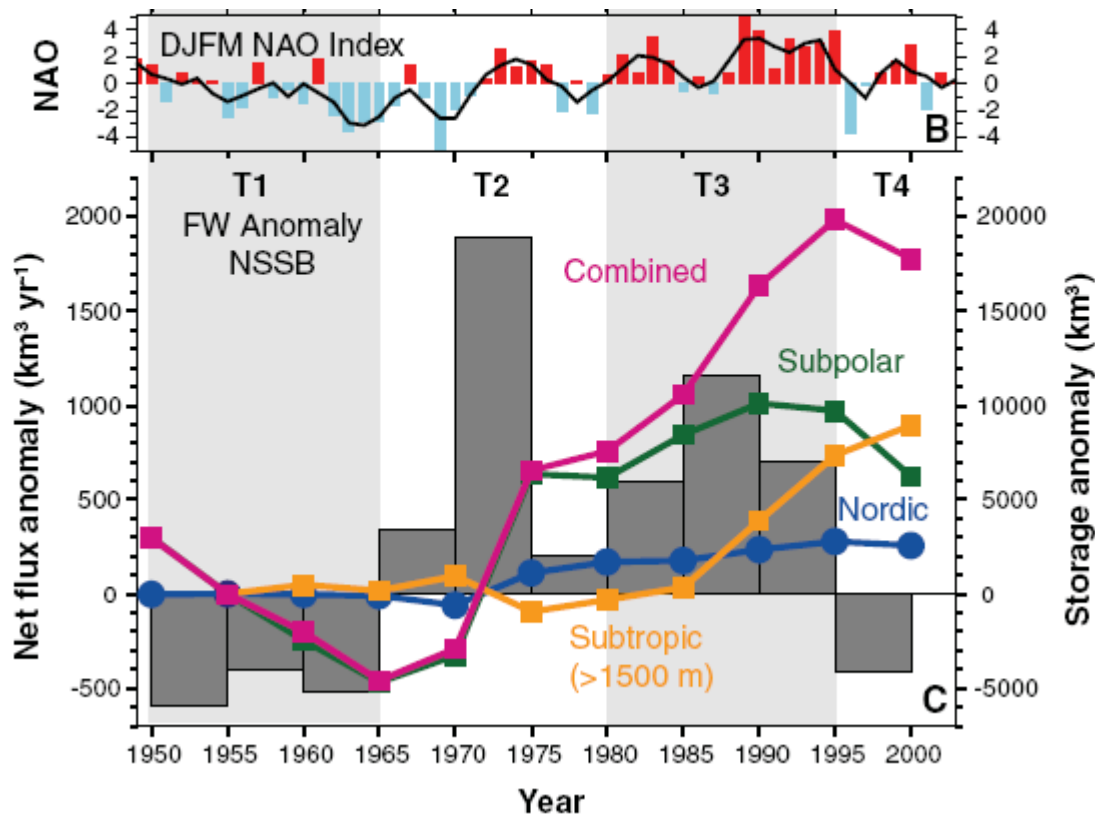
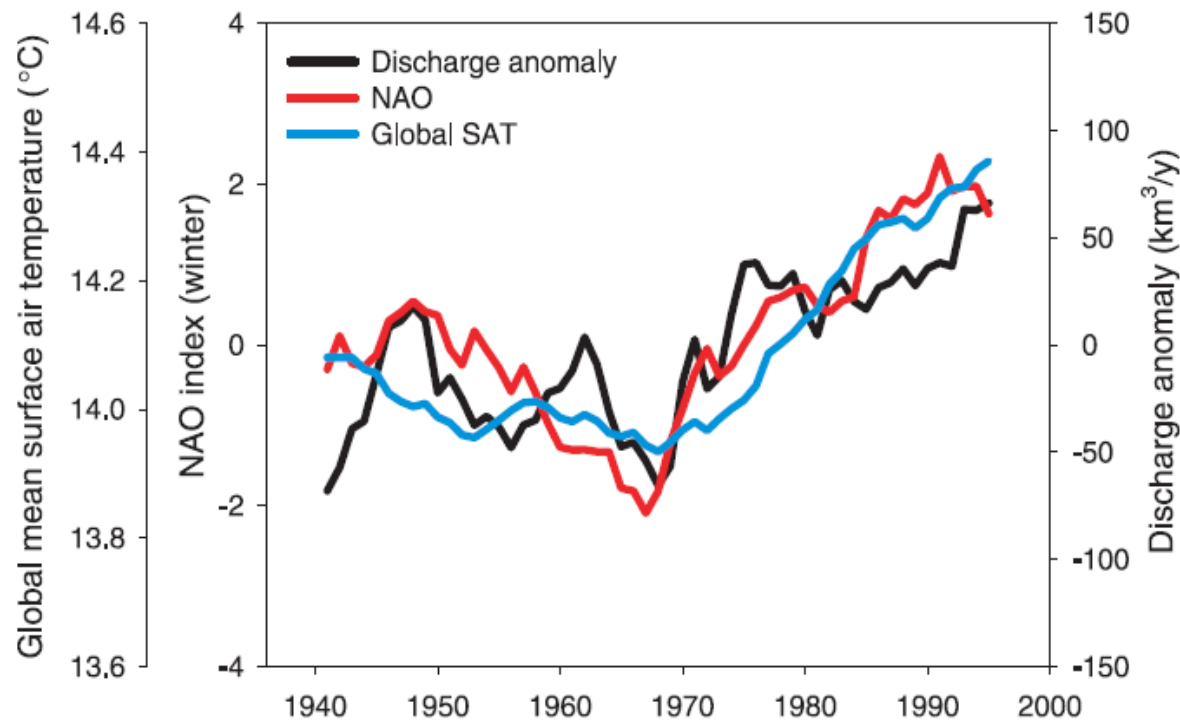
Wg. Masłowskiego (wykład w IOPAN, 2007) około 2/3 topnienia lodów należy przypisać ciepłu płynącego z prądami morskimi.



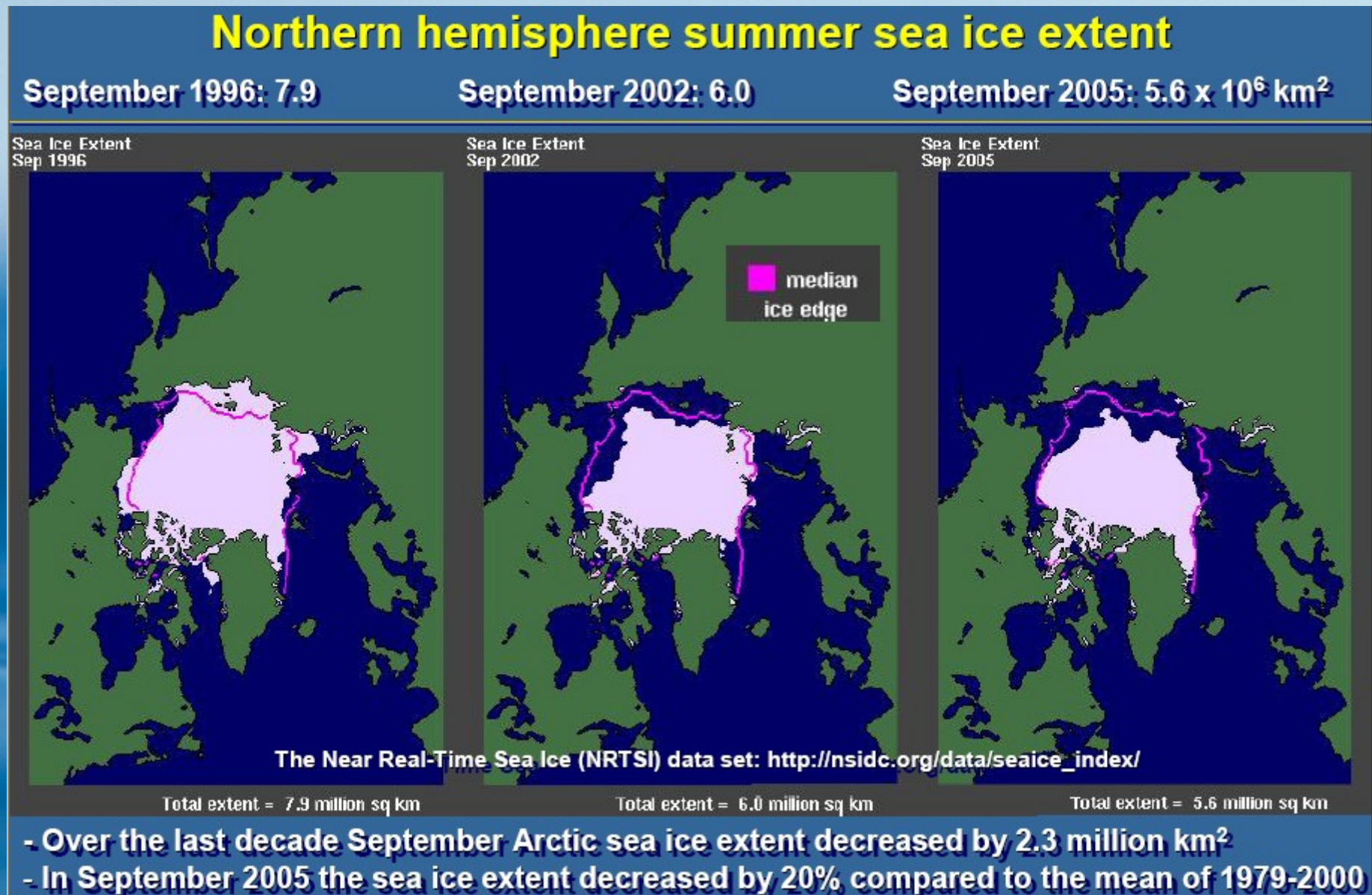
Dopływ słodkiej wody

Dopływ słodkiej wody z rzek syberyjskich zwiększył się o 7% między 1936 a 1999 r. Anomalia ta koreluje zarówno z temperaturą jak NAO.

Północny Atlantyk od lat 1960ch do 1990ch zyskał 20,000 km³ słodkiej wody ze zwiększonego dopływu rzecznego i zmian P-E, 15,000 km³ z topienia lodu morskiego oraz 2,000 km³ z topienia lodowców. Po lewej strumienie (szare słupki) i ilość zgromadzonej wody słodkiej w poszczególnych basenach Pn. Atlantyku.



Zmiany zalodzenia Oceanu Arktycznego

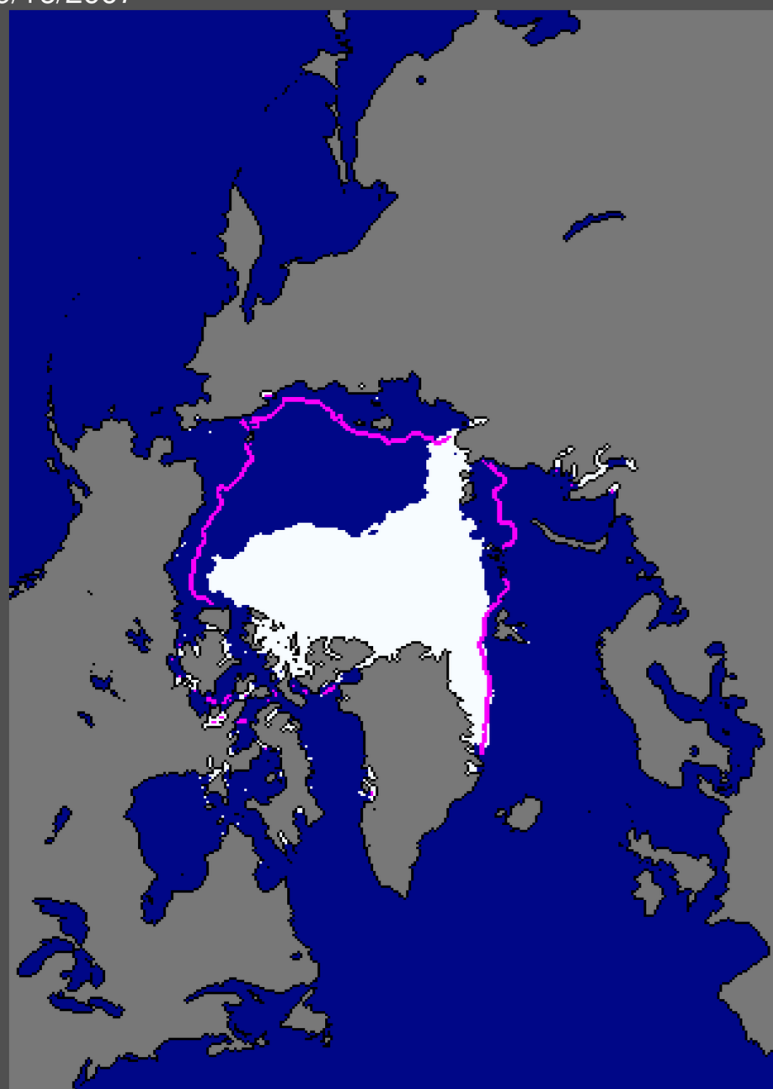


Obserwowane zmiany letniego pokrycia lodem morskim Arktyki

Masłowski 2006

Rekordowe lata 2005, 2007, 2012 i sąsiednie..

Current Ice Extent
09/16/2007

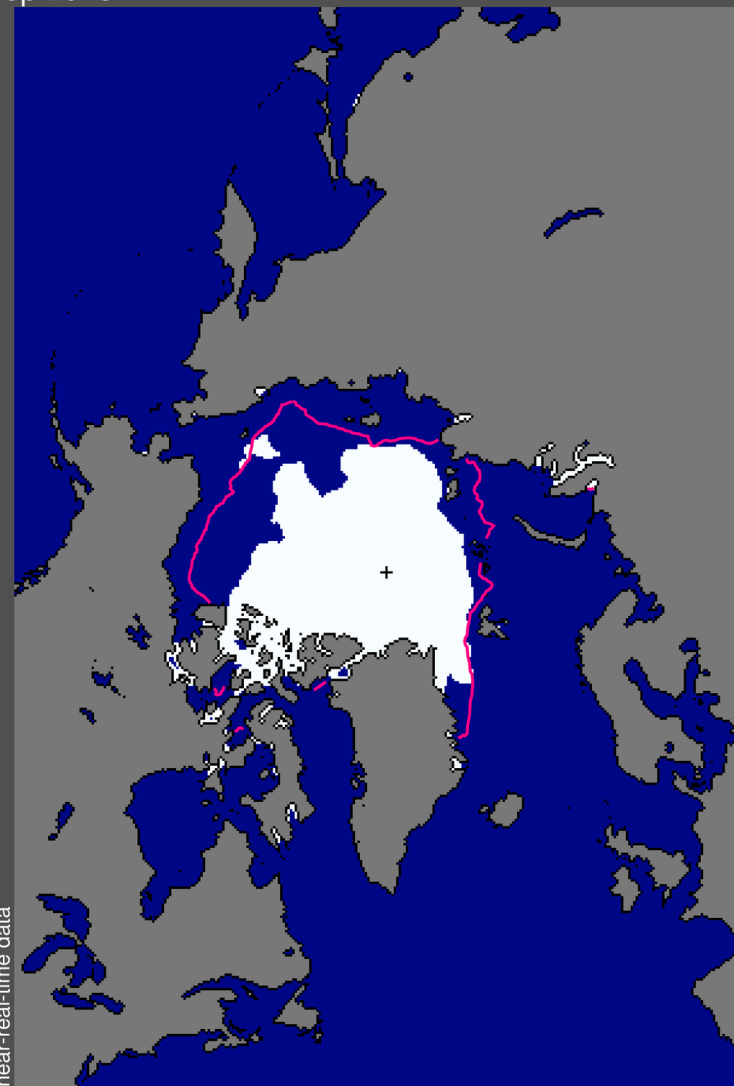


National Snow and Ice Data Center, Boulder, CO

median
ice edge

Total extent = 4.1 million sq km

Sea Ice Extent
Sep 2016



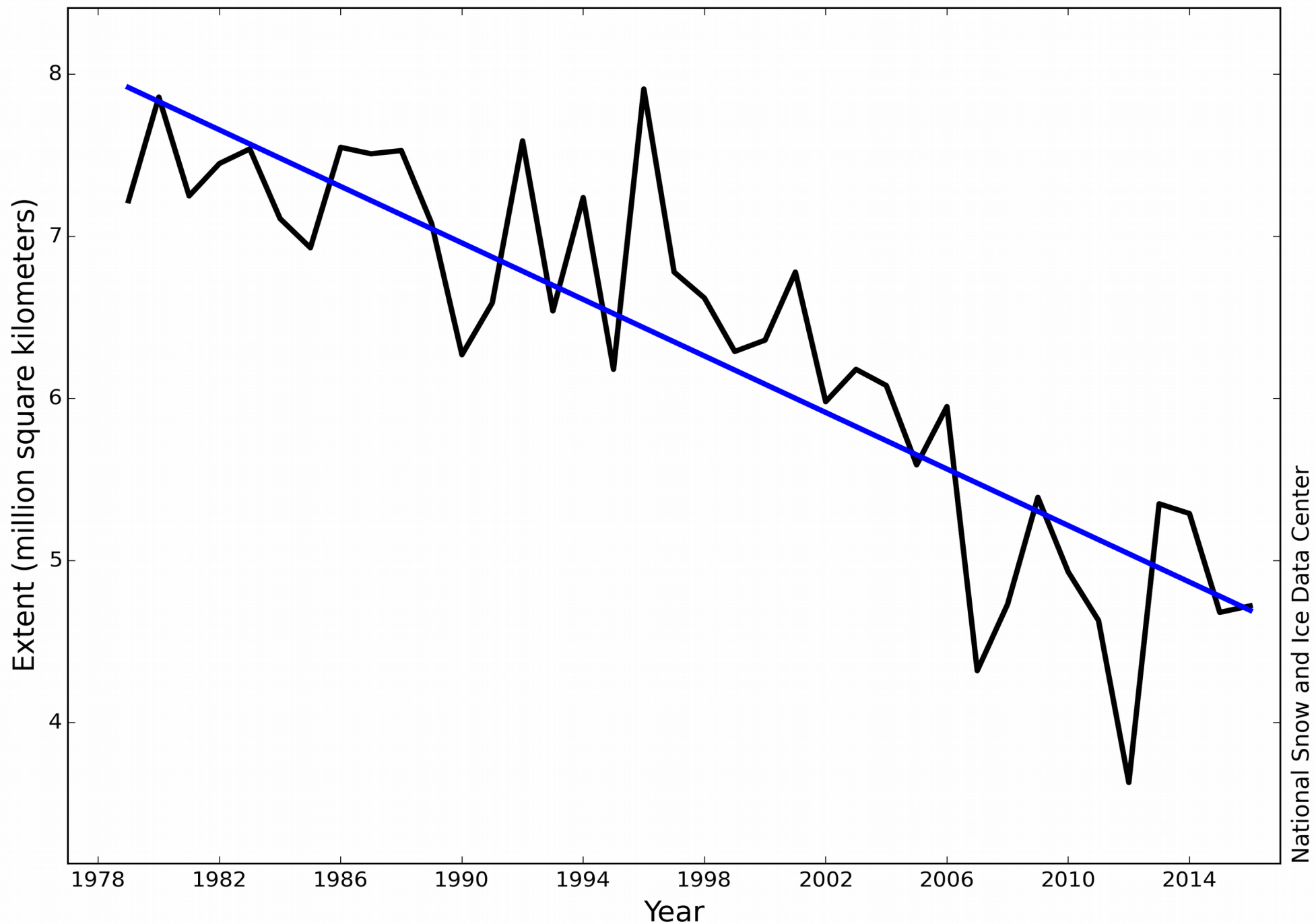
National Snow and Ice Data Center, Boulder, CO

median
ice edge

Total extent = 4.7 million sq km

Latem 2007 (po lewej) zanotowano rekordowo niski stan zalodzenia Oceanu Arktycznego: 4.1 mln km³. W roku 2012 zanotowano 3.6 mln km³ był kolejnym rekordem. Przejście Północno-Zachodnie było wolne od lodu od 2007 do 2012 (sześciokrotnie!) po raz pierwszy w historycznych czasach

Average Monthly Arctic Sea Ice Extent September 1979 - 2016



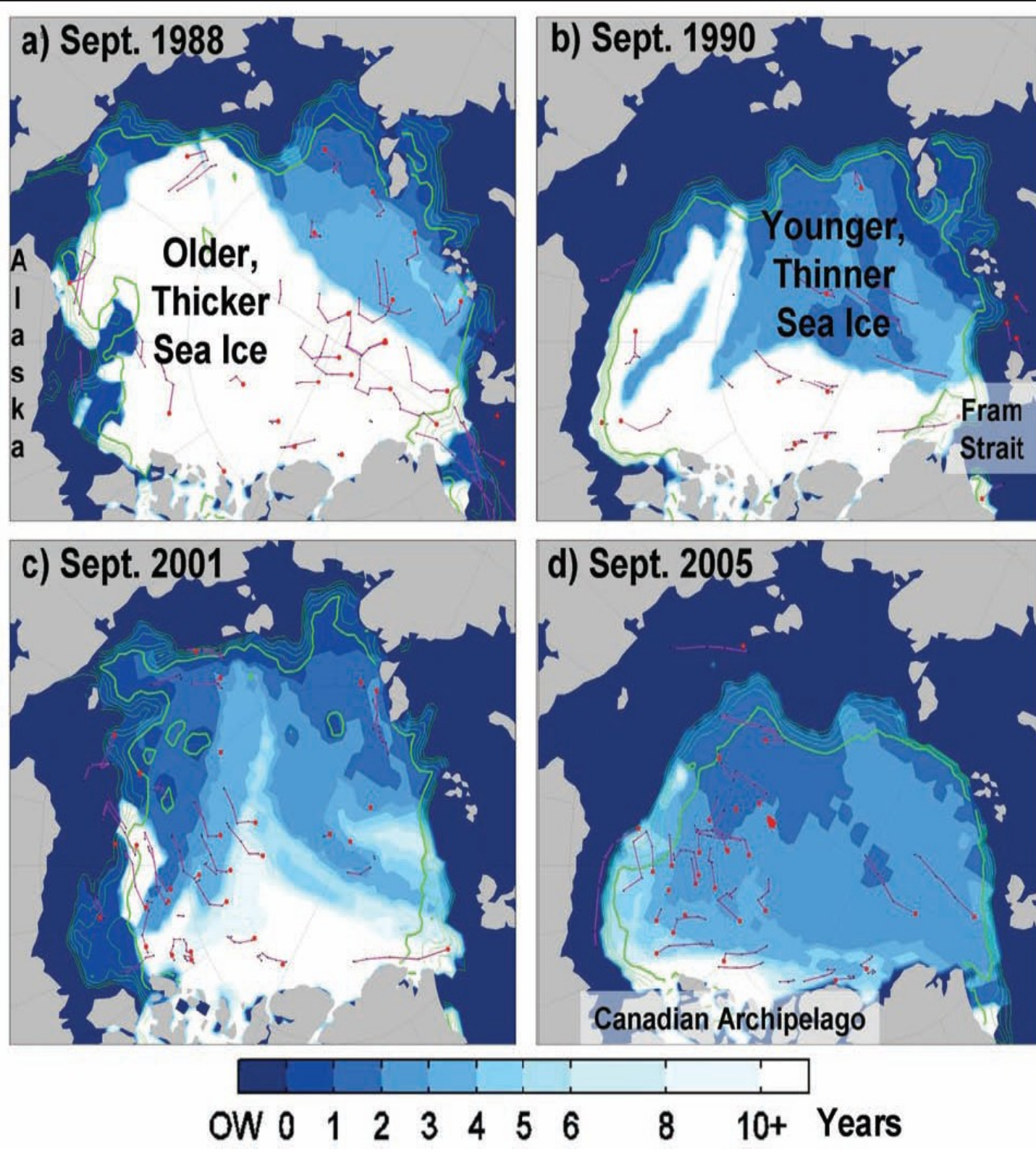
National Snow and Ice Data Center

Lód coraz młodszy

Zmiany wieku lodu we wrześniu na podstawie sieci boi dryfujących i modelowania.

Widoczne jest szybkie zanikanie lodu wieloletniego.

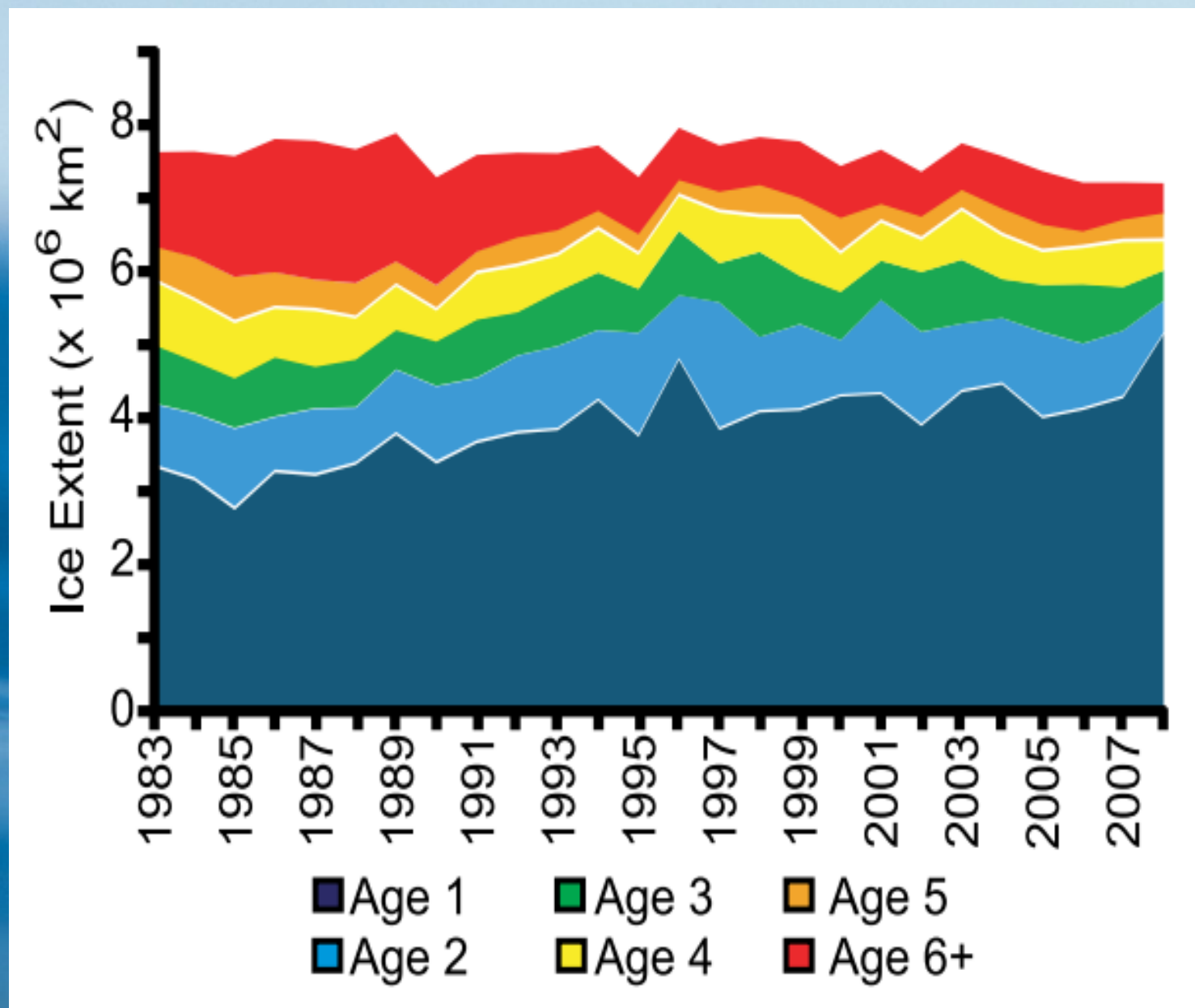
Oznacza to, że objętość lodu w Oceanie Arktycznym spada znacznie szybciej niż powierzchnia.



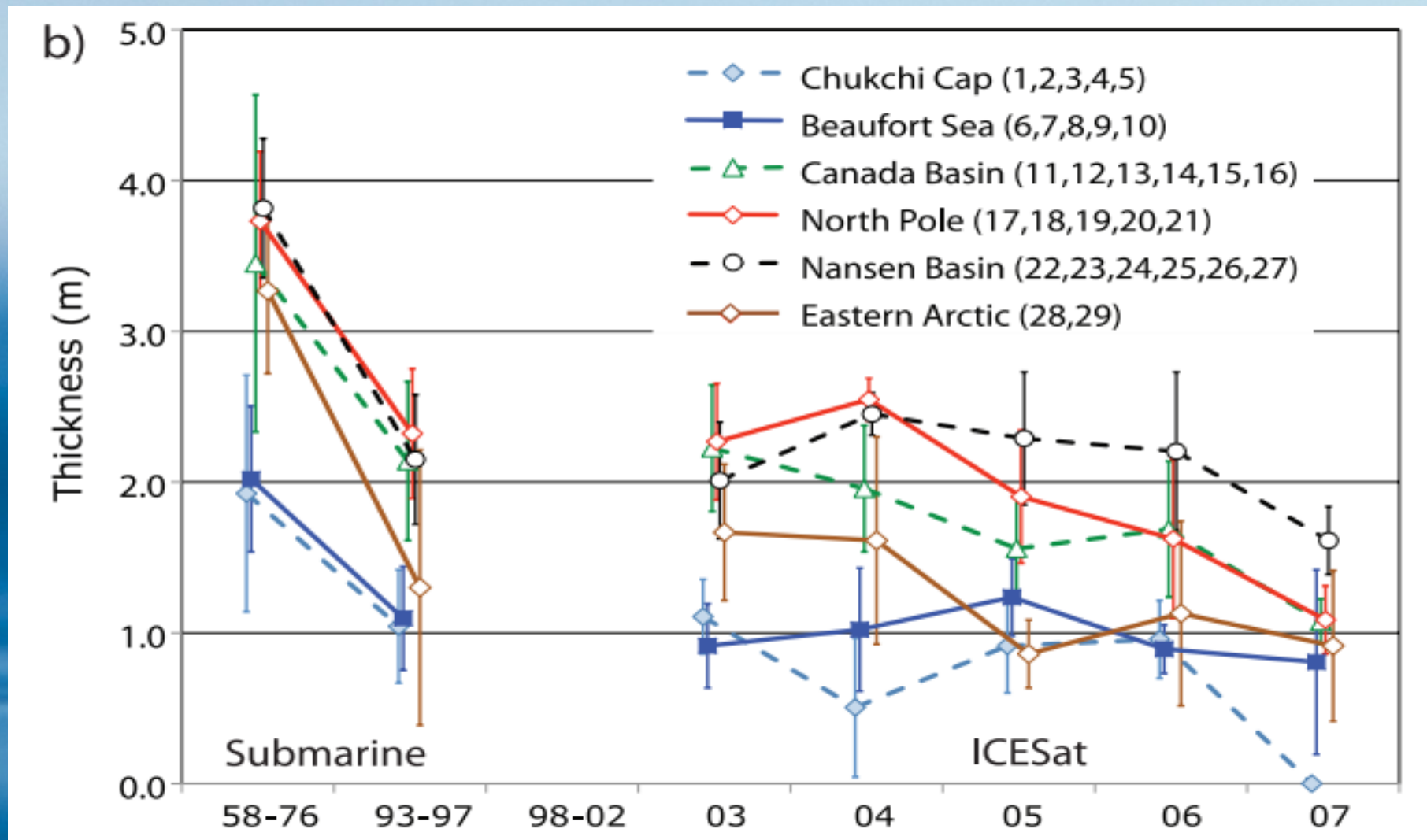
*Richter-Menge et al. 2006
(State of the Arctic)*

Lód w Arktyce coraz młodszy

Podział ilości lodu morskiego w Arktyce (79 -90 N) na klasy wg. wieku lodu w latach.

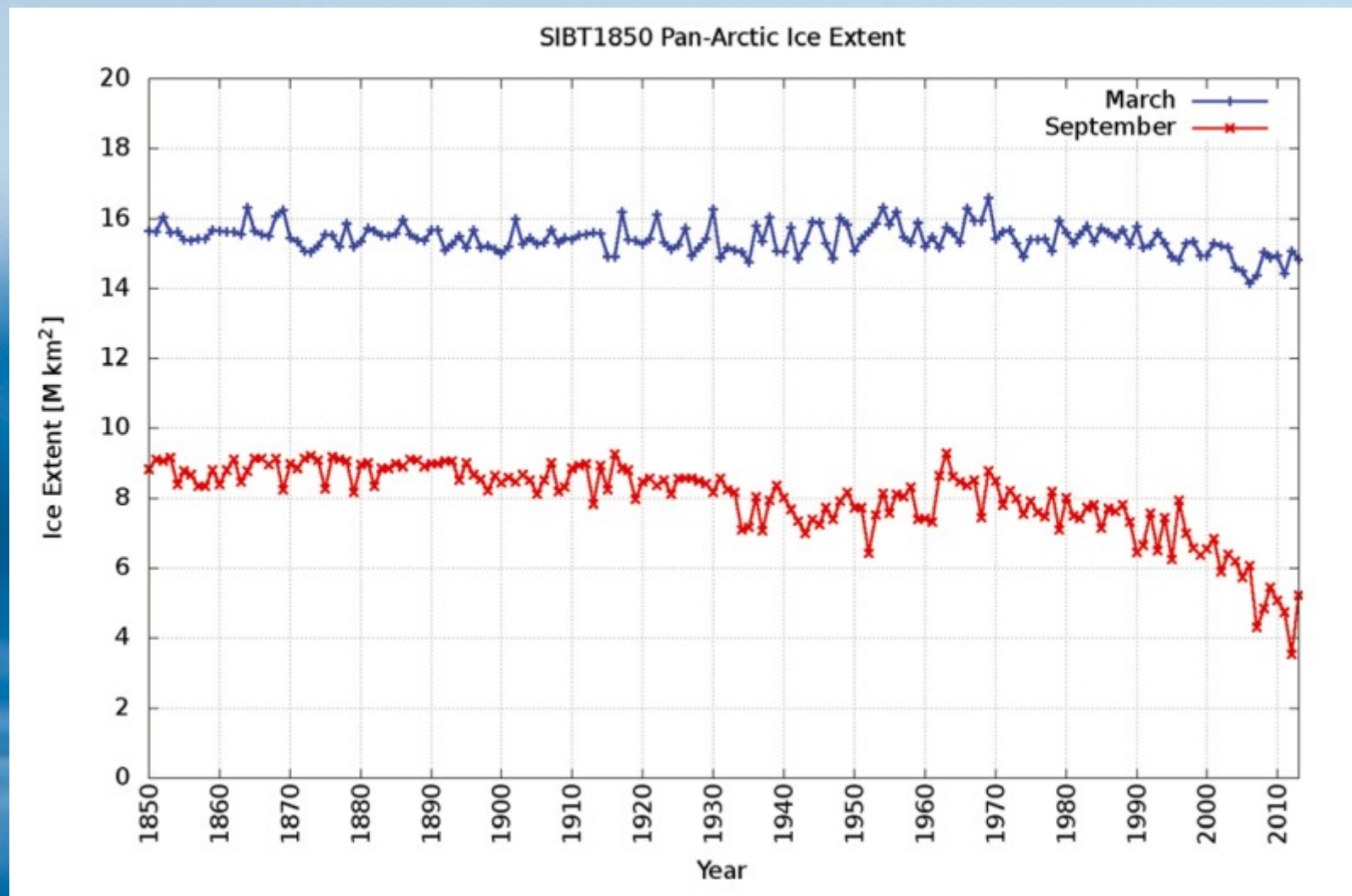


Lód w Arktyce coraz cieńszy



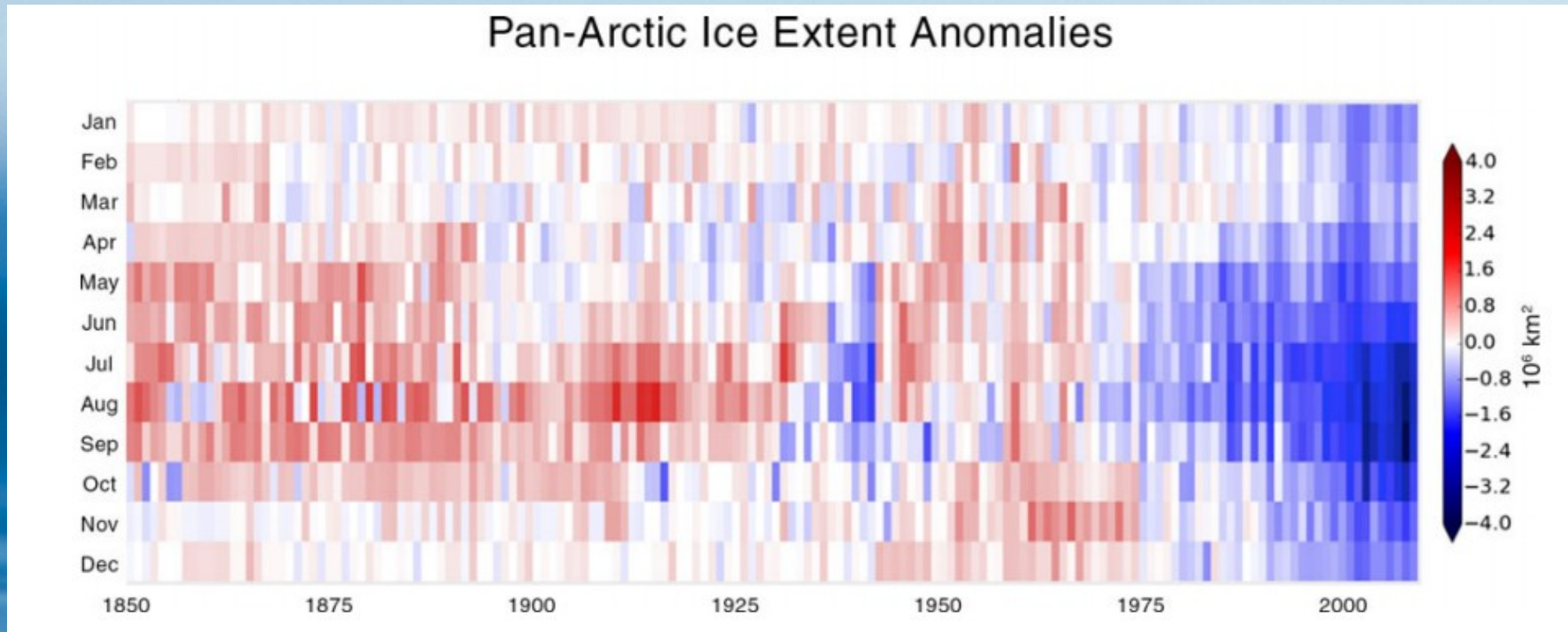
Porównanie dawnych pomiarów akustycznych grubości lodu arktycznego z okrętów podwodnych z radarowymi pomiarami satelitarnymi z lat 2003-2008 (satelita ICESat) pokazuje, że średnia grubość lodu zmniejszyła się os 1980 roku prawie o 50%.

Lód w Arktyce: dłuższe spojrzenie



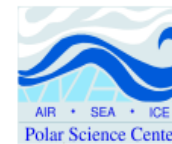
Rekonstrukcja zasięgu lodu morskiego w Arktyce w marcu i wrześniu, na podstawie analizy matematycznej wszystkich dostępnych danych historycznych.

Lód w Arktyce: dłuższe i głębsze spojrzenie

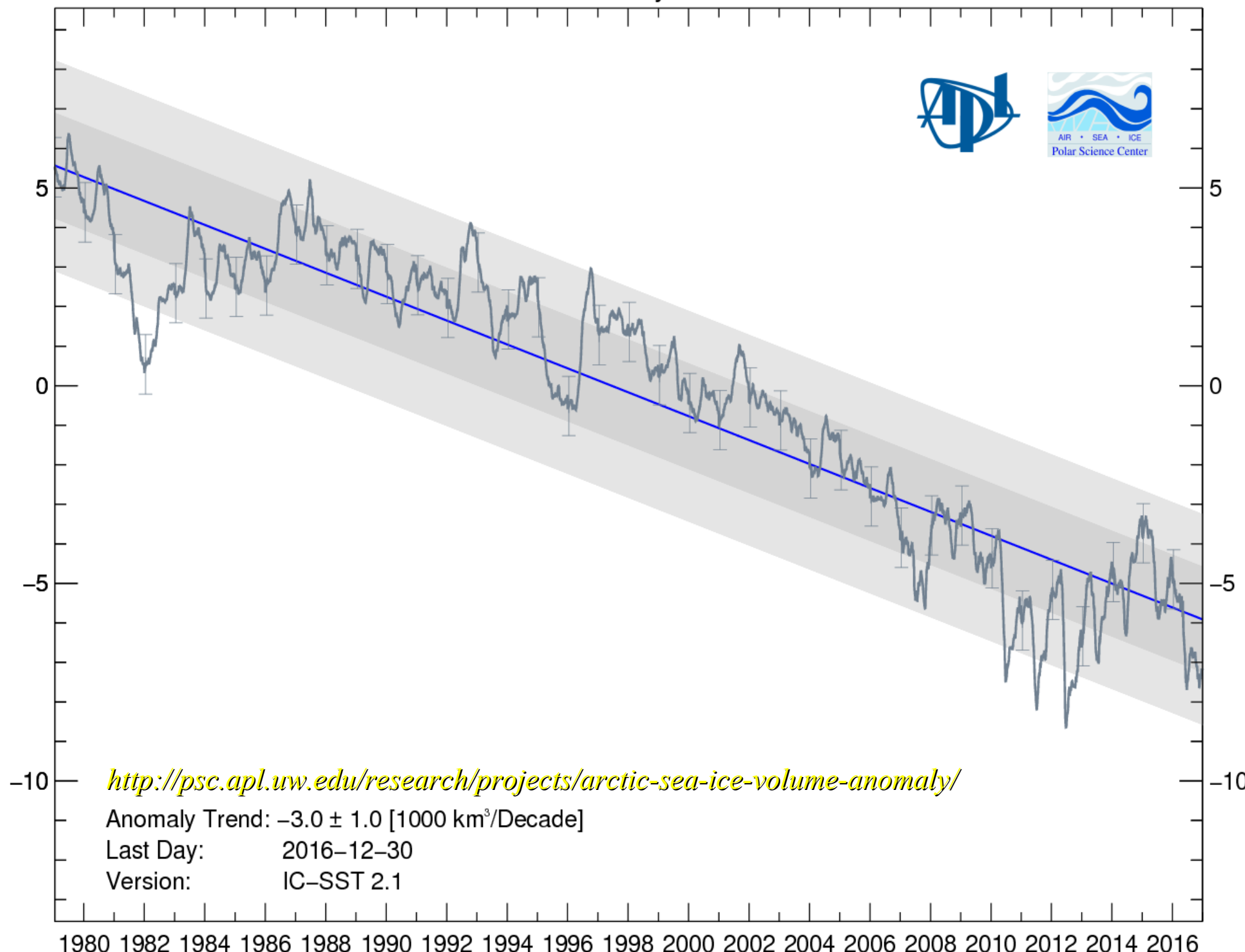


Anomalie zasięgu lodu morskiego w Arktyce względem średniej z lat 1850-2013 dla każdego roku i miesiąca.

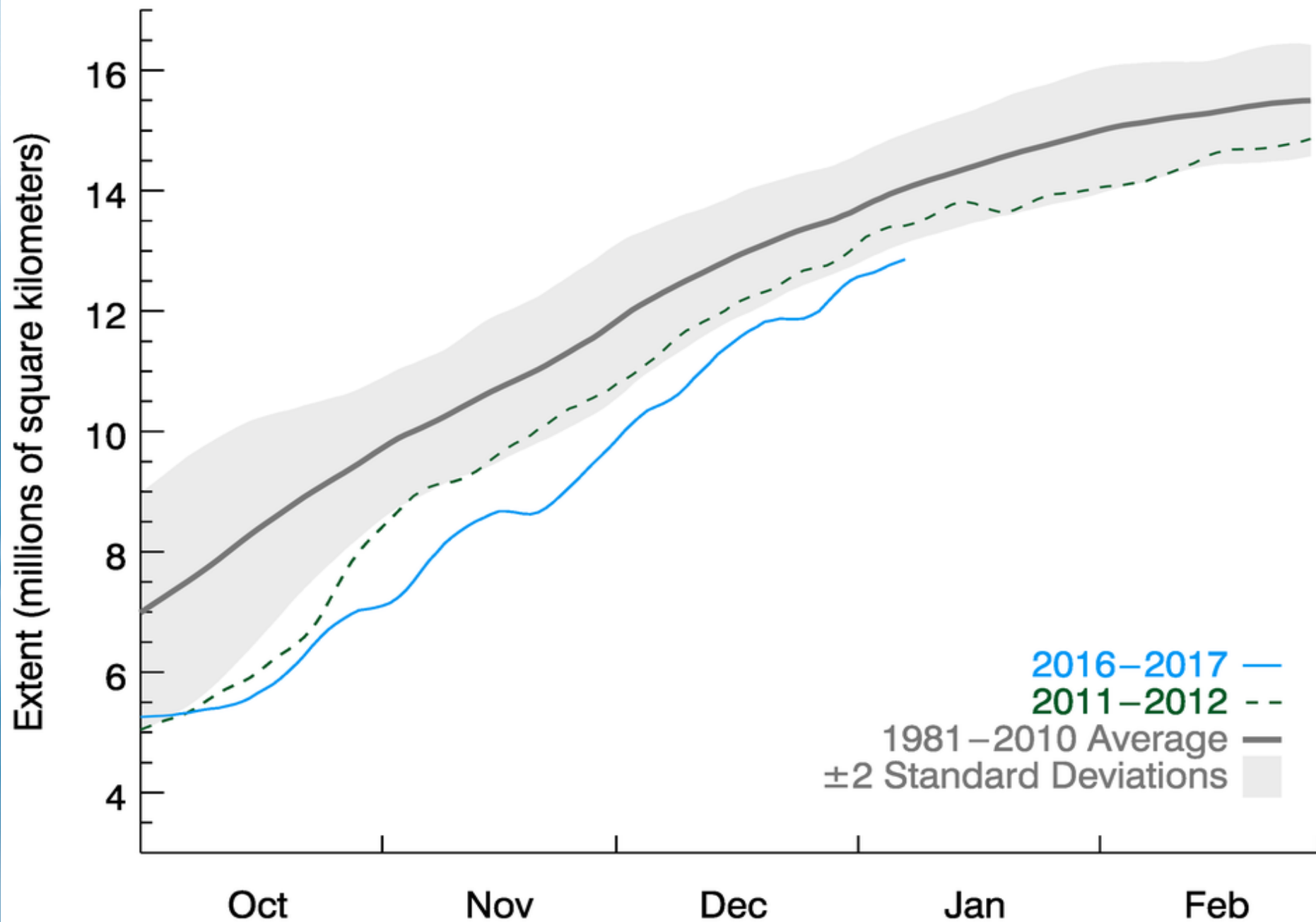
Arctic Sea Ice Volume Anomaly and Trend from PIOMAS



Ice Volume Anomaly relative to 1979–2015 [1000 km³]

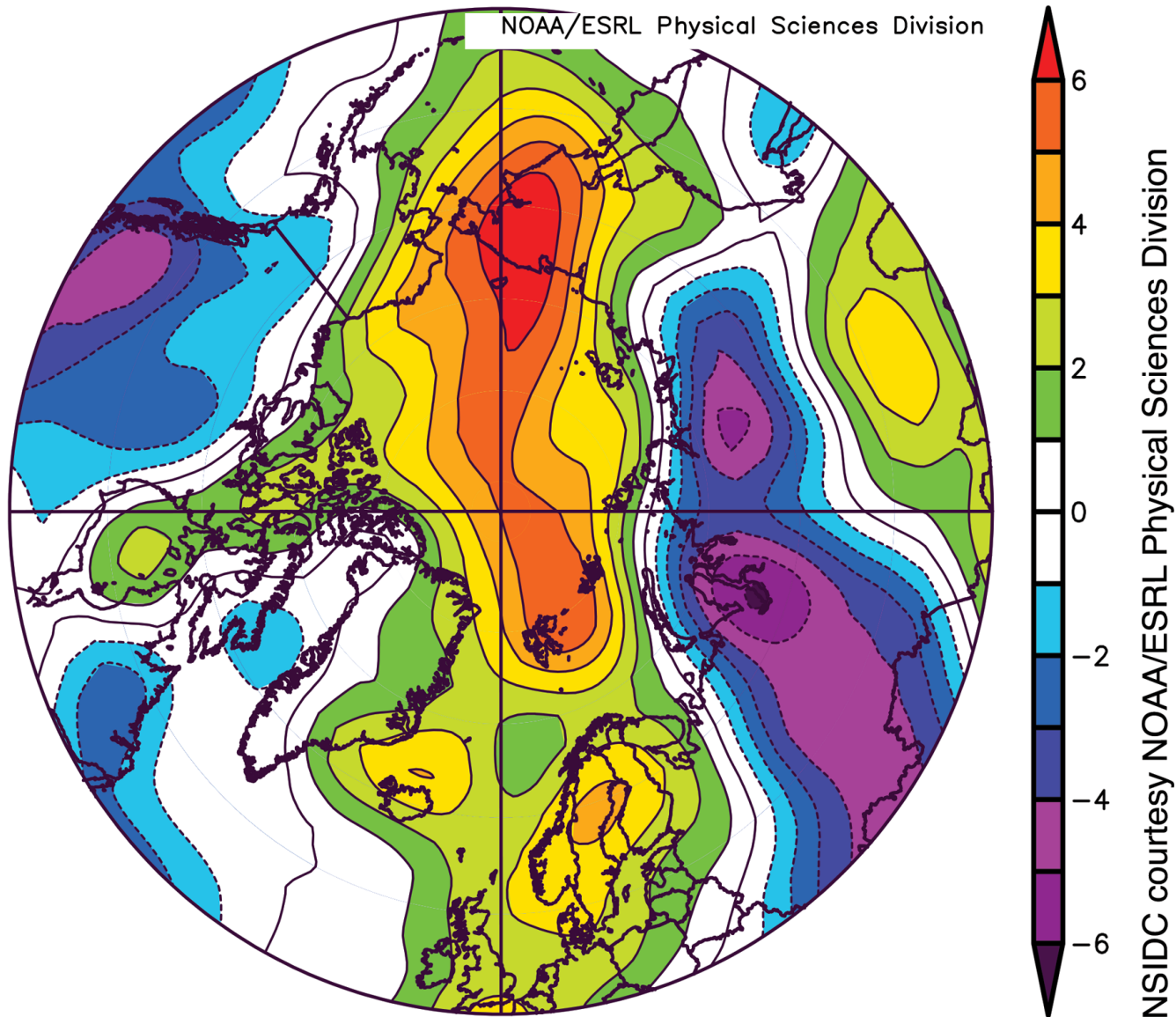


Arctic Sea Ice Extent (Area of ocean with at least 15% sea ice)

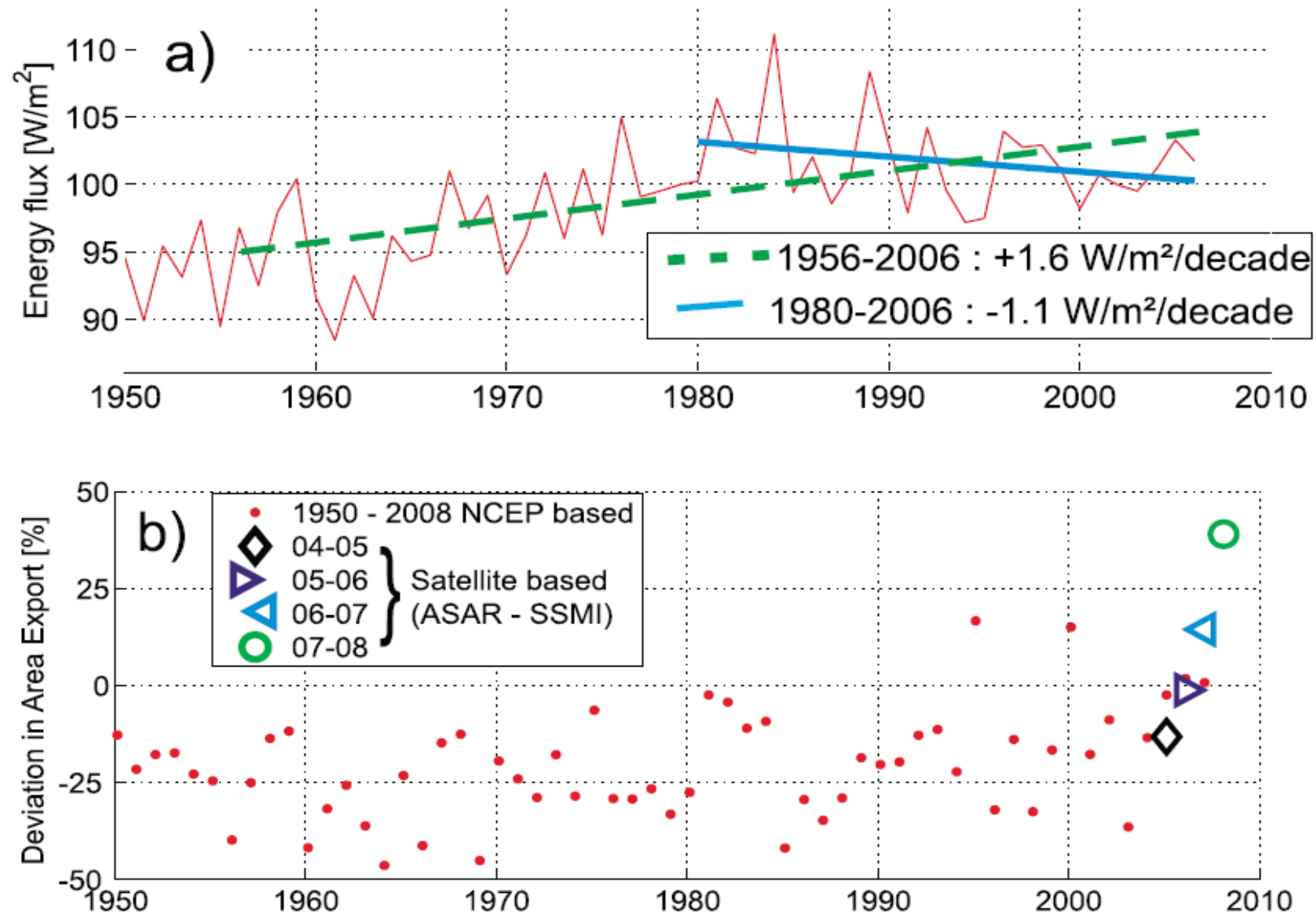


National Snow and Ice Data Center, Boulder CO

Air Temperature Difference December 2016



Mechanizmy topnienia lodu



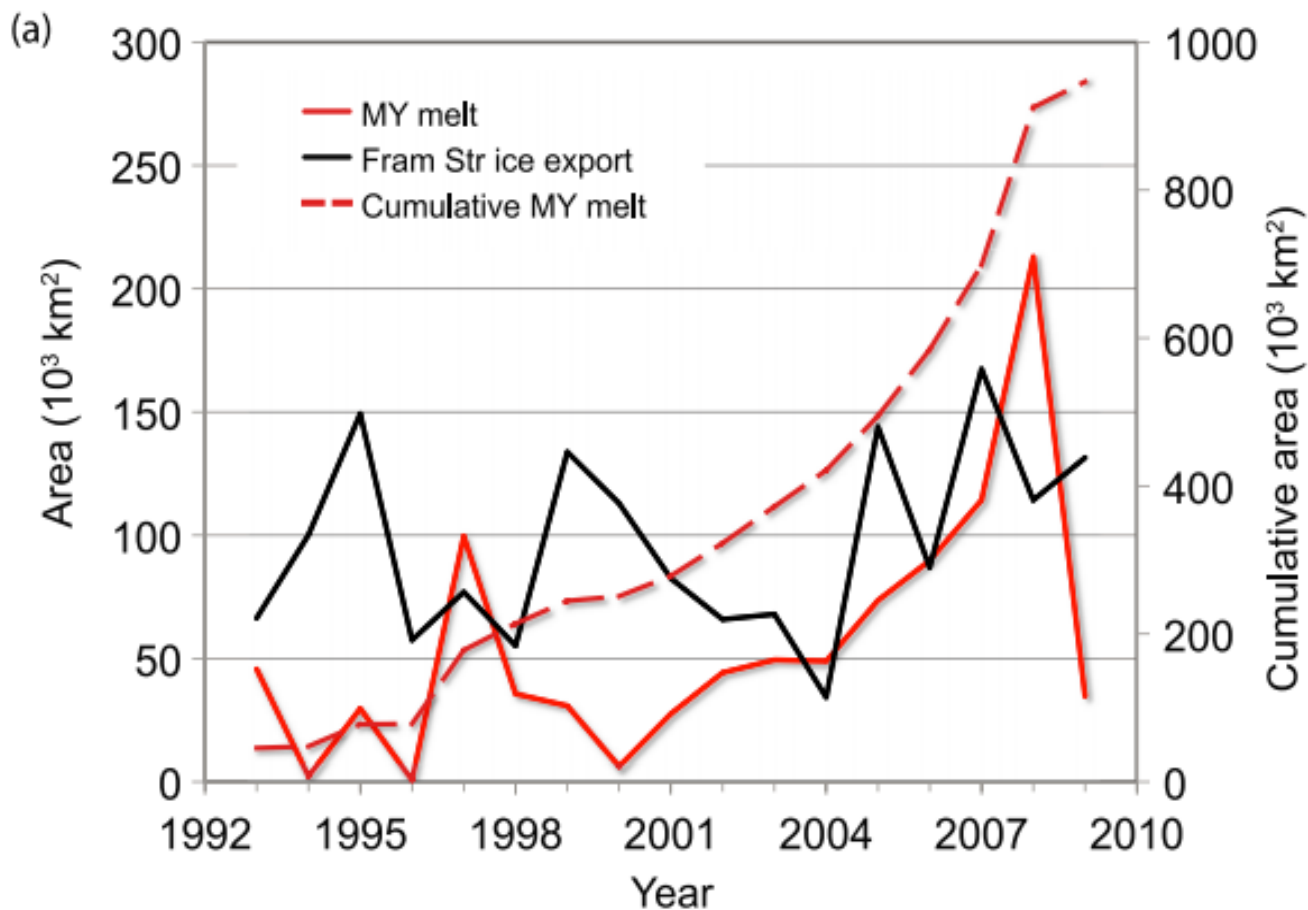
Strumień ciepła niesiony do Arktyki cyrkulacją atmosferyczną (reanaliza NCEP-NCAR) (a) oraz eksport lodu cieśniną Framą (b). Dodatkowymi mechanizmami są transport prądami morskimi, oraz zmiany zachmurzenia w Arktyce.

Smedsrud et al. 2008 (GRL)

Przyczyny topnienia lodu: dyskusja trwa...

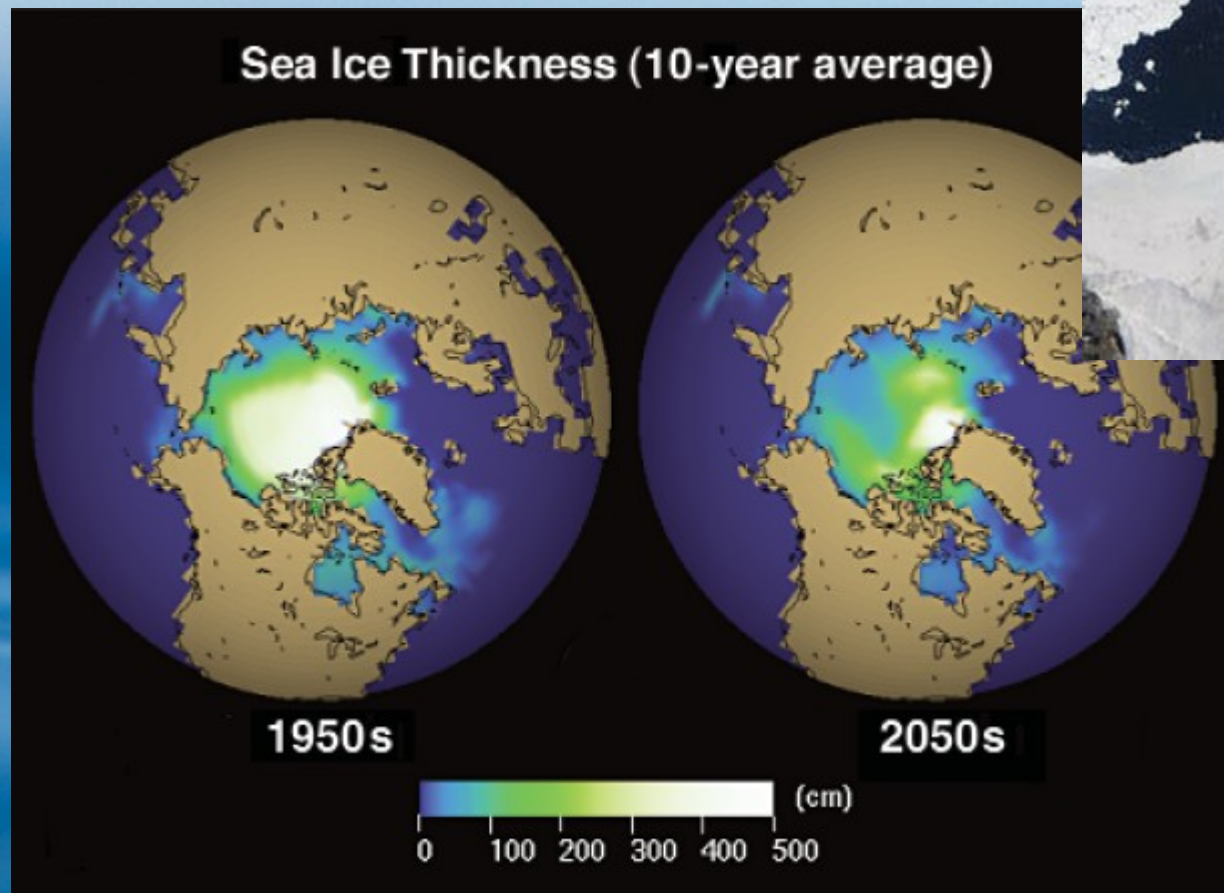
- Zhang et al. 2008 *"What drove the dramatic retreat of arctic sea ice during summer 2007?"*
"70% is due directly to the amplified melting and 30% to the unusual ice advection"
- Smedsrud Sorteberg Kloster 2008 *"Recent and future changes of the Arctic sea-ice cover"*
"satellite observations of Fram Strait ice-area export show an increase over the last four years, with ~37% increase in winter 07–08. Atmospheric poleward energy flux declined since 1990, but advection of oceanic heat has recently increased."
- Ogi et al. 2008 *"Summer retreat of Arctic sea ice: Role of summer winds"*
"July–August–September SLP anomalies over the Arctic basin account for ~60% of the year-to-year variance of September sea-ice extent since 1979."

Gdzie się podziewa wieloletni lód?



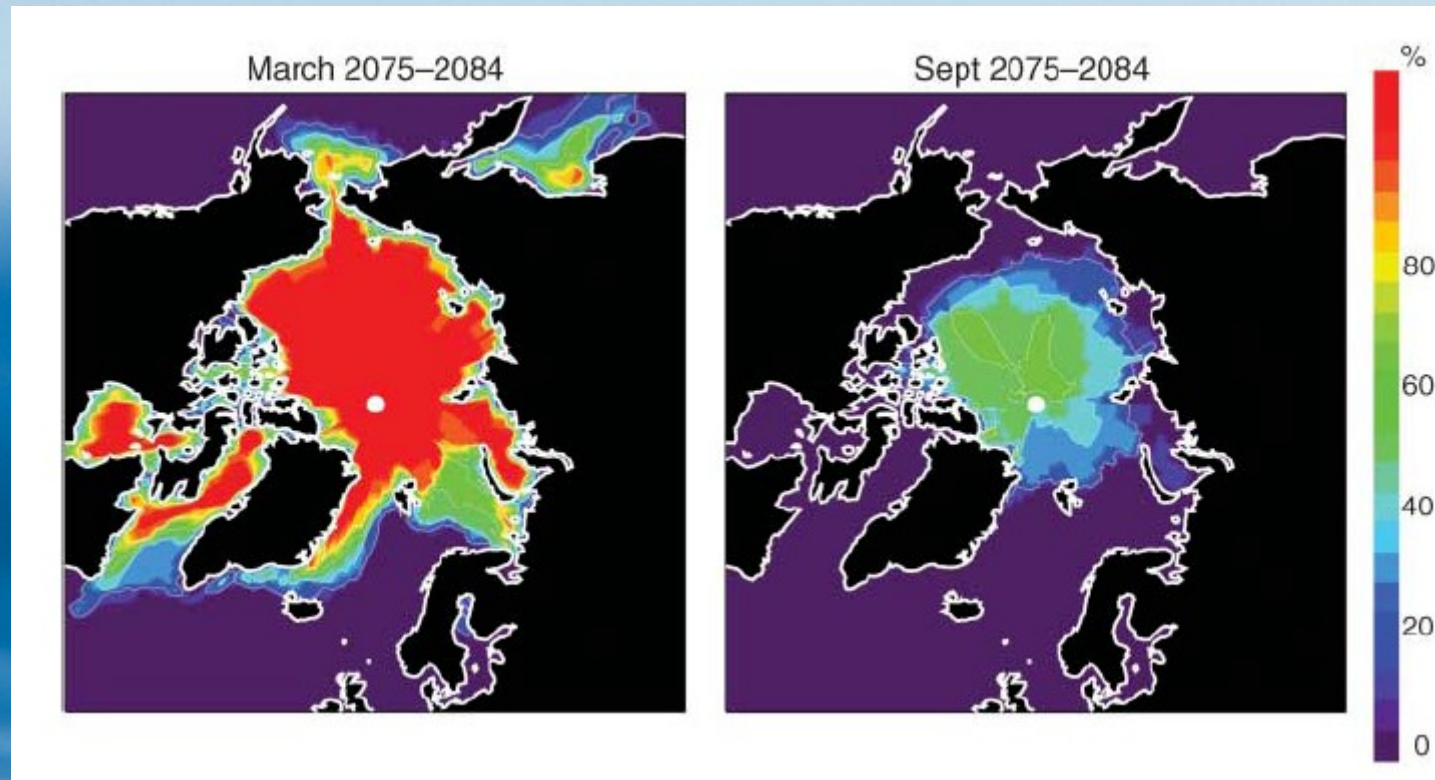
Obliczenia wskazują, że podobna ilość lodu wieloletniego topi się na Morzu Beauforta (czerwona linia ciągła i czerwona ramka na mapce) jak i jest wypychana z Arktyki przez Cieśninę Framm (czarna linia). Linia przerywana jest kumulatywną powierzchnią lodu stopionego na Morzu Beauforta.

Prognozowane zmiany zalodzenia Oceanu Arktycznego (2002)



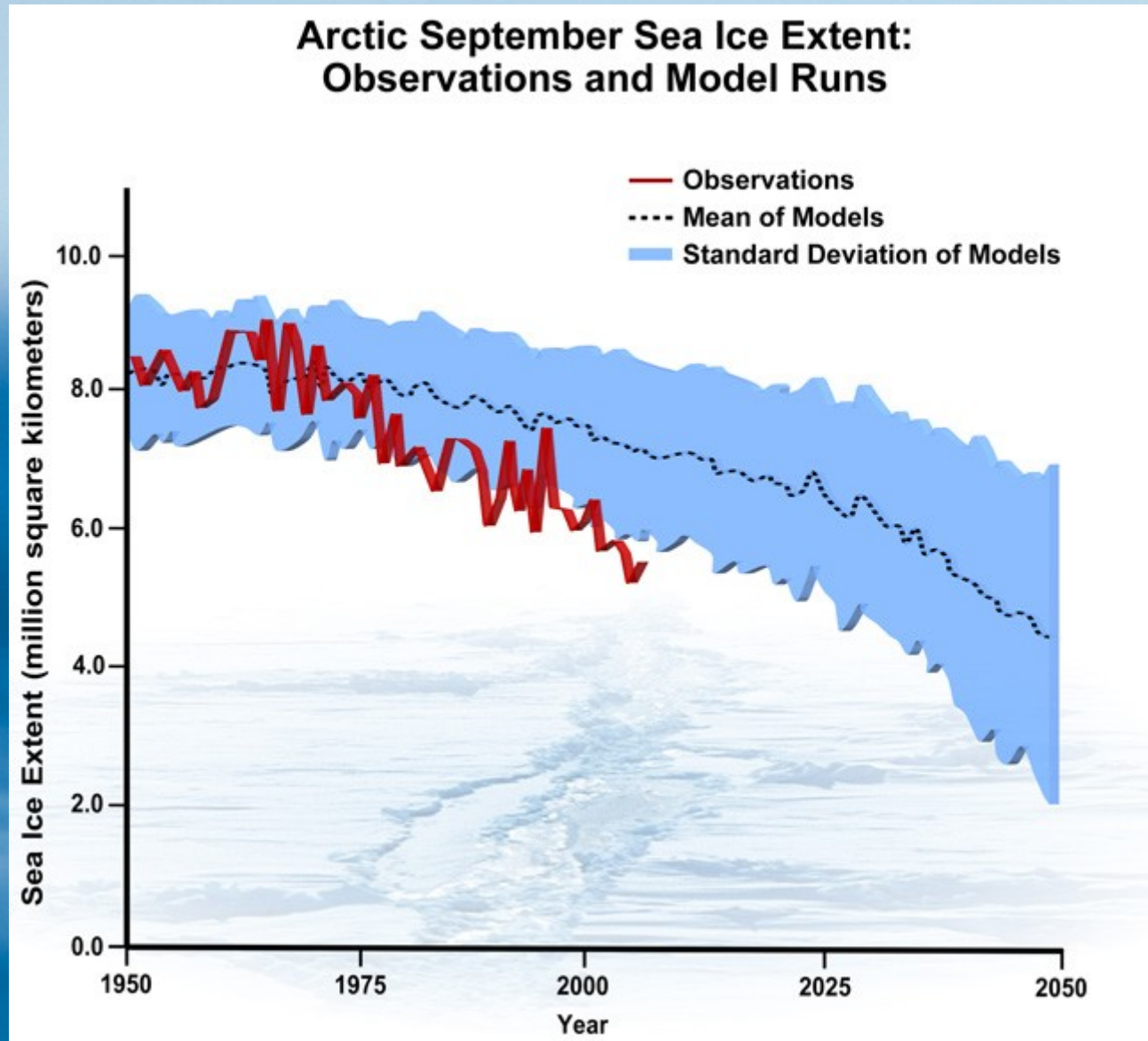
Obserwowane i prognozowane zmiany letniego pokrycia lodem morskim Arktyki, stan wiedzy (i modelowania) na rok 2002.

Prognozowane zmiany zalodzenia Oceanu Arktycznego (2007)



Procent pokrycia lodem Oceanu Arktycznego w marcu i wrześniu 2075-2084 dla scenariusza A1B i modelu CCSM3. Stan wiedzy (i modelowania) na rok 2007.

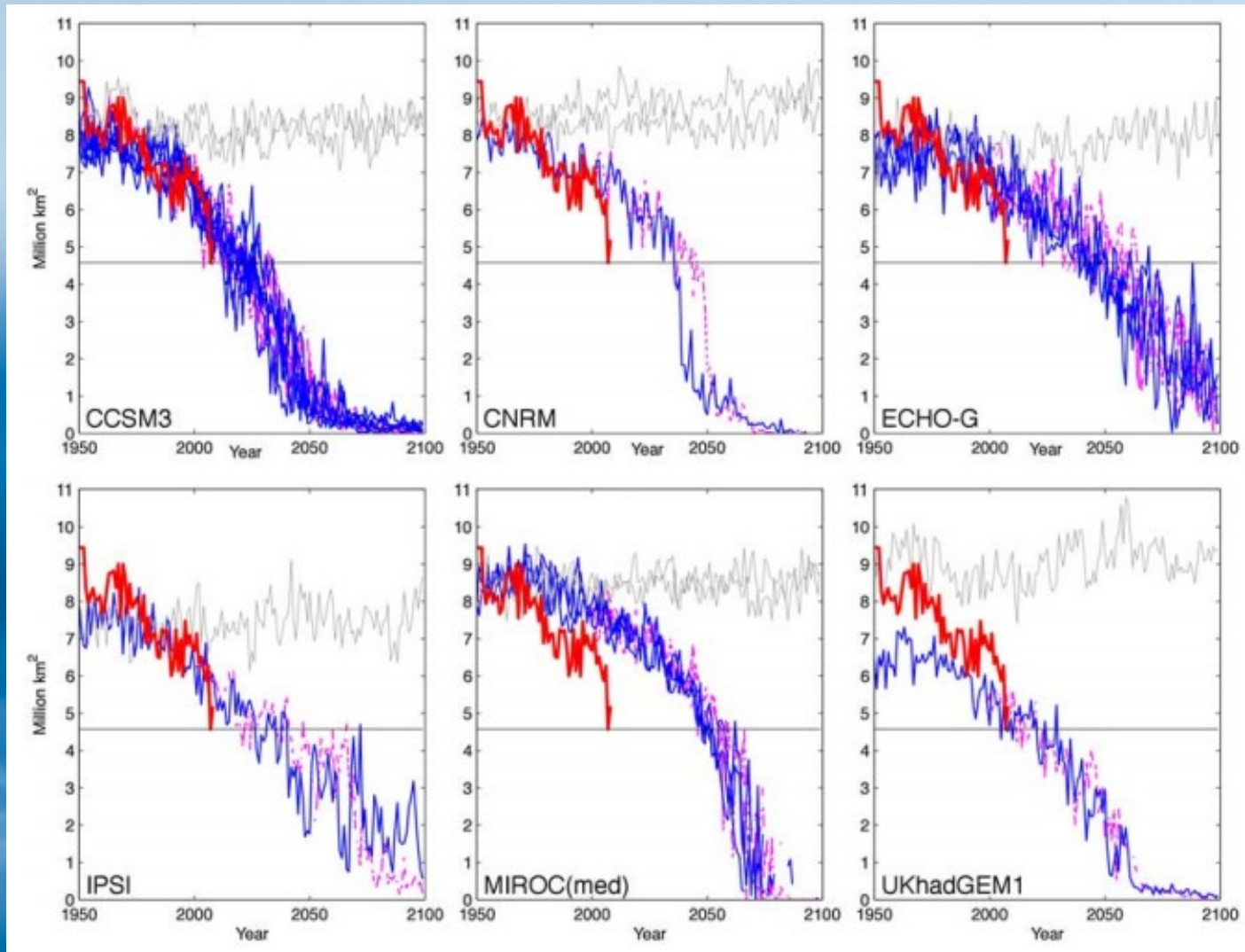
Niestety nasze modele są zbyt optymistyczne



Pokrycie Oceanu Arktycznego lodem we wrześniu; modele (błękitny pas) i 9-letnią średnią pomiarów (czerwona linia). Modele przewidują zbyt wolne zmiany w porównaniu z zachodzącymi. Jeśli przedłużyć czerwona linię...

www.ucar.edu after Stroeve et al. 2007 (Geophysical Review Letters)

Arktyka latem wolna od lodu w ciągu 30 lat?

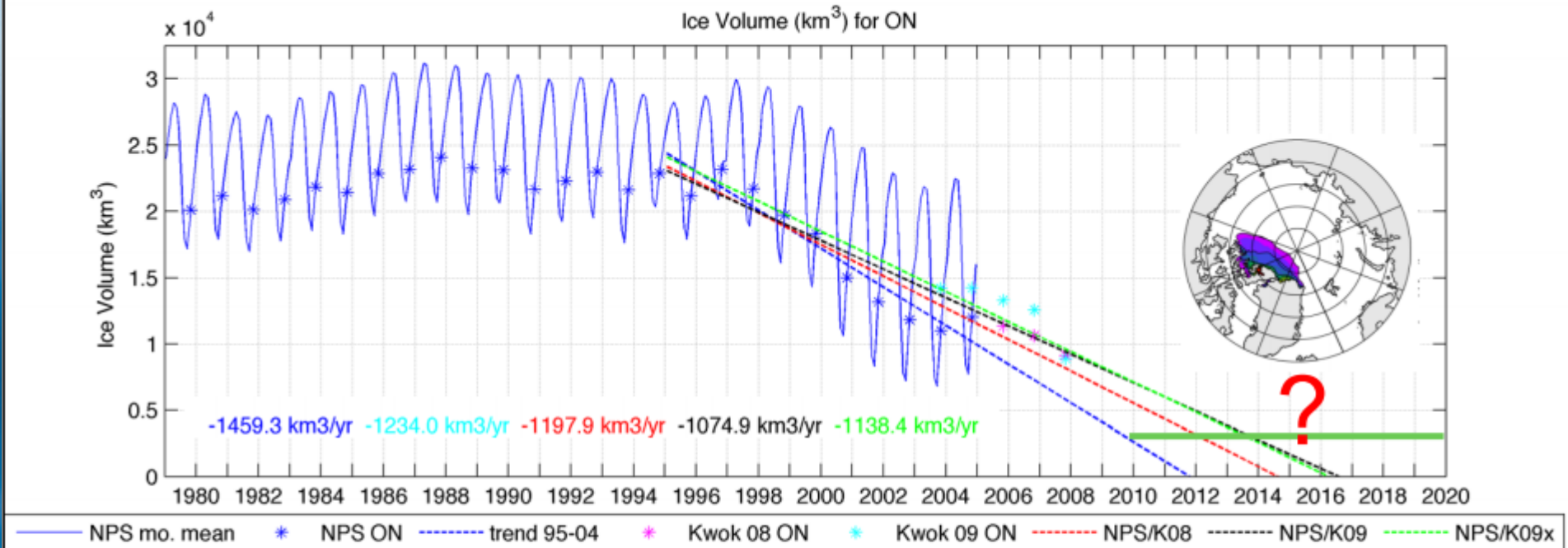


Przyszłe pokrycie Oceanu Arktycznego lodem według sześciu modeli cyrkulacji, które najlepiej odzwierciedlały zmiany w ostatnich latach (czerwone) Linie niebieskie to scenariusz A1B, magenta to A2 a szare to run kontrolny (bez wymuszenia antropogenicznego)

Wang & Overland. 2009 (GRL)

Arktyka latem wolna od lodu w ciągu 5 lat? Nie!

Arctic Sea Ice Volume Trends



Observational estimates (cyan / purple stars):

- Obs Fall (ON) '07 volume $< 9000 \text{ km}^3$ (~20% uncertainty)
- Negative volume trends: 1197 - 1234 km^3/yr
- Combined (95-07) model / data linear volume trend of $-1075 \text{ km}^3/\text{yr}$
projects ice-free fall by 2016 (± 3 yrs uncertainty - 95-07)
- Some (?) sea ice may remain beyond due to increased ridging of thinner ice

Śmiałe prognozy: Arktyka latem bez lodu „do 2013” r.?

Page last updated at 10:40 GMT, Wednesday, 12 December 2007

 E-mail this to a friend

 Printable version

Arctic summers ice-free 'by 2013'

By Jonathan Amos

Science reporter, BBC News, San Francisco

Scientists in the US have presented one of the most dramatic forecasts yet for the disappearance of Arctic sea ice.

Their latest modelling studies indicate northern polar waters could be ice-free in summers within just 5-6 years.

Professor Wieslaw Maslowski told an American Geophysical Union meeting that previous projections had underestimated the processes now driving ice loss.

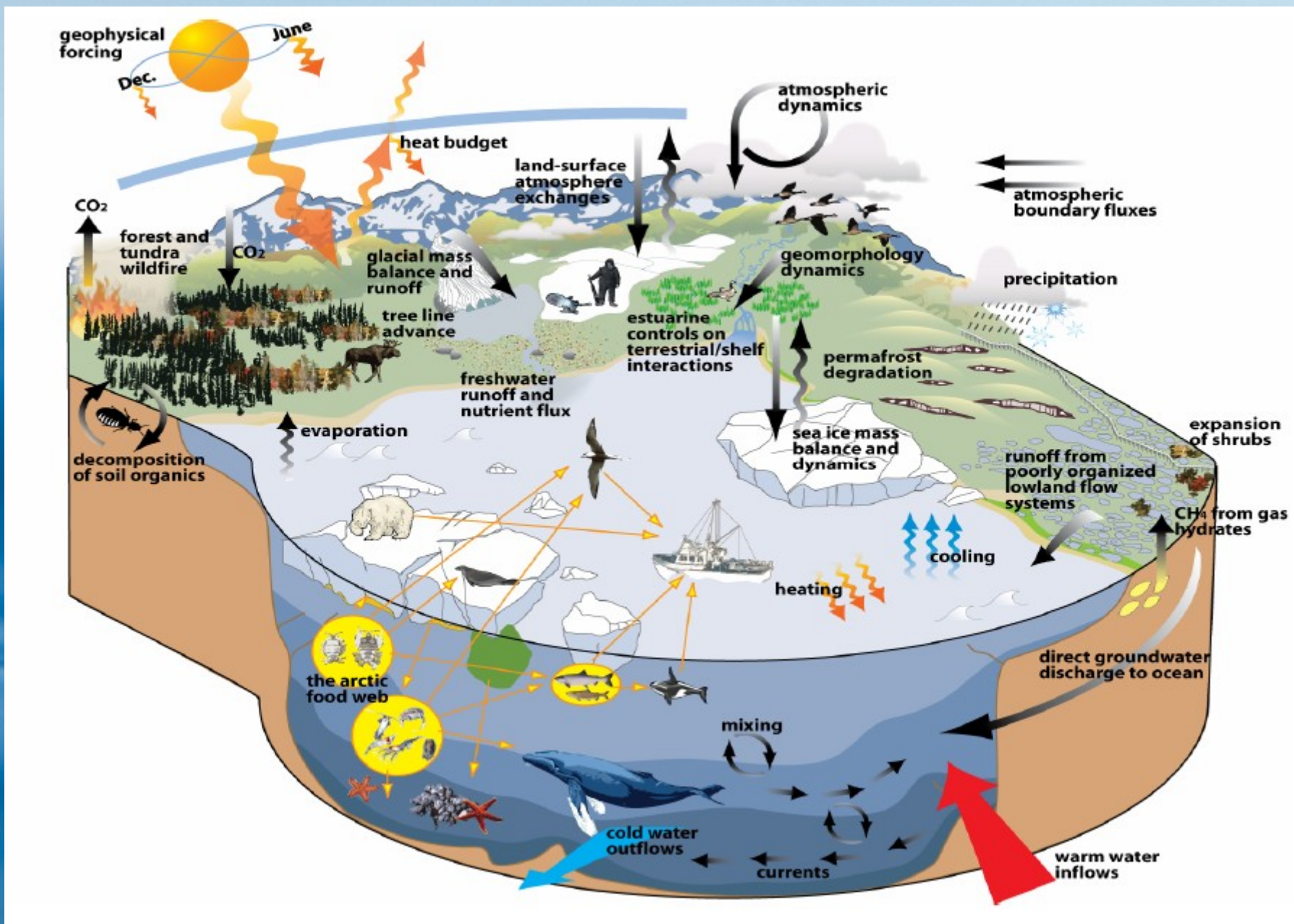


Arctic summer melting in 2007 set new records

Professor Maslowski's group, which includes co-workers at Nasa and the Institute of Oceanology, Polish Academy of Sciences (PAS), is well known for producing modelled dates that are in advance of other teams.

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7139797.stm>

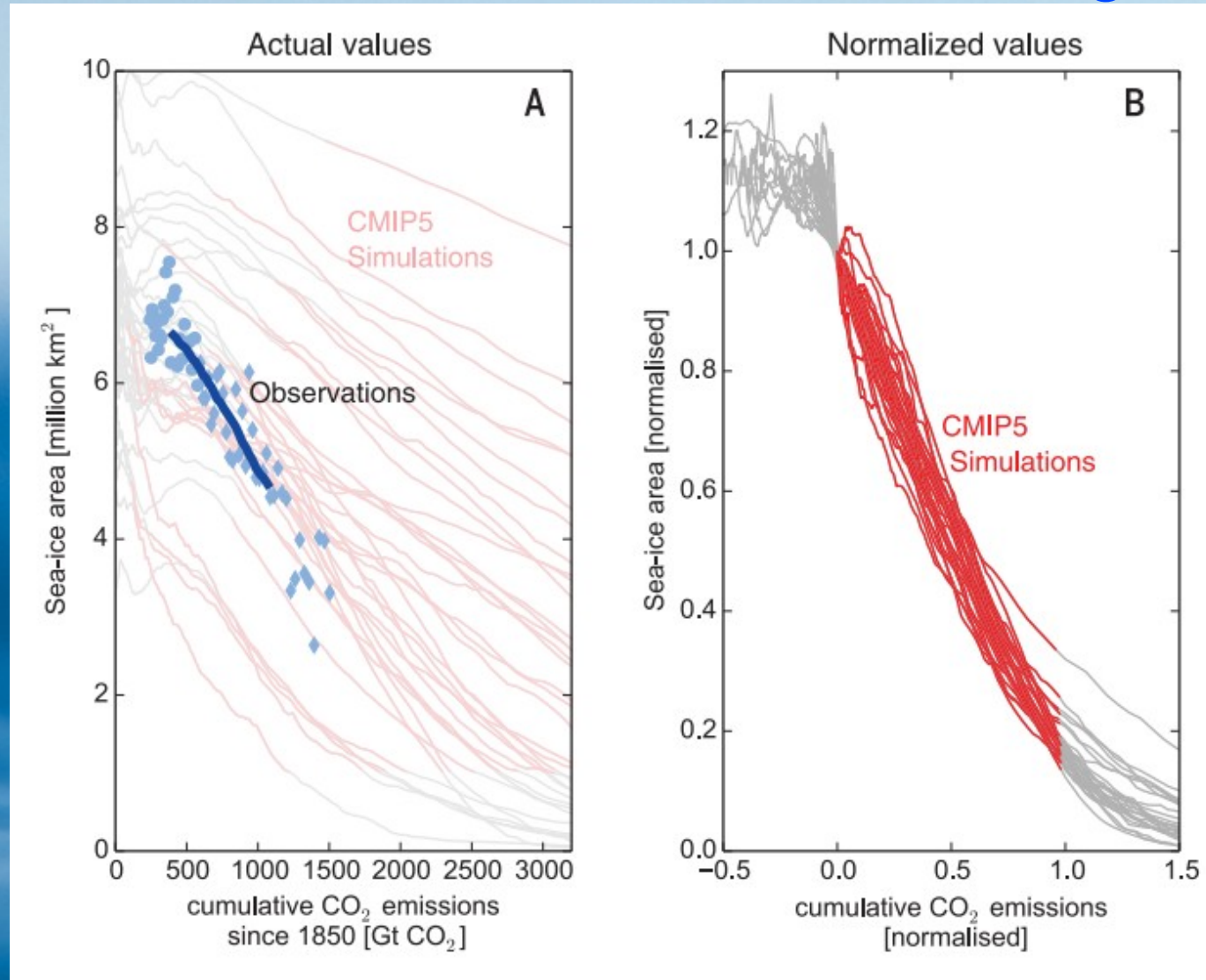
Arktyka przyszłości



Ekosystem i ludzie będą musieli przyzwyczaić się do zmian w Arktyce.
Naukowcy będą z tego jeszcze długo żyli...

Walsh 2006 (IARC overview)

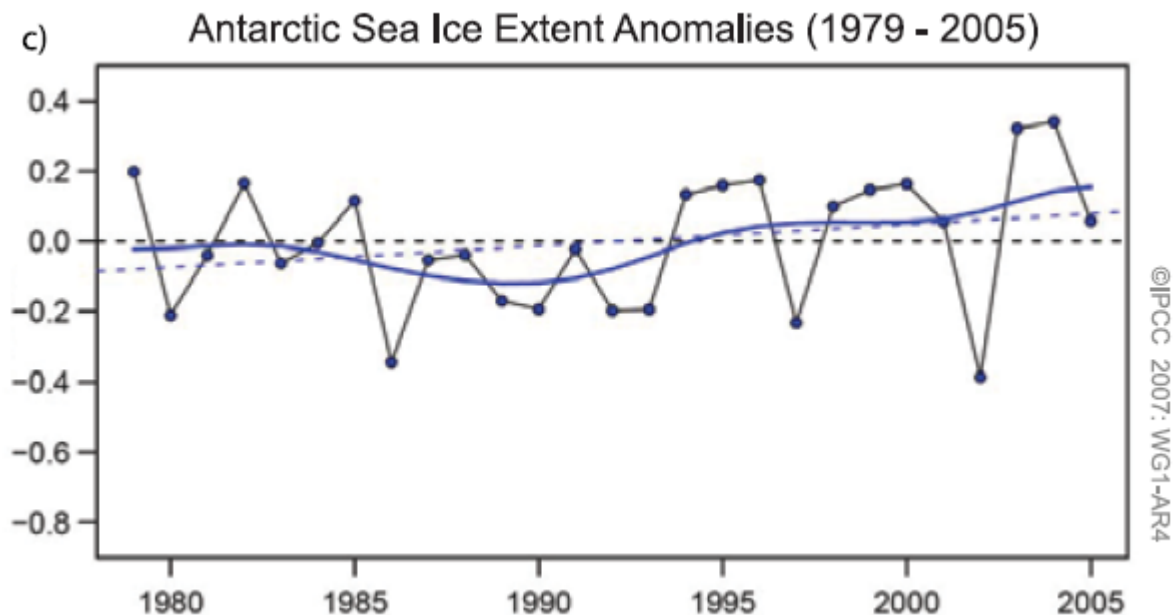
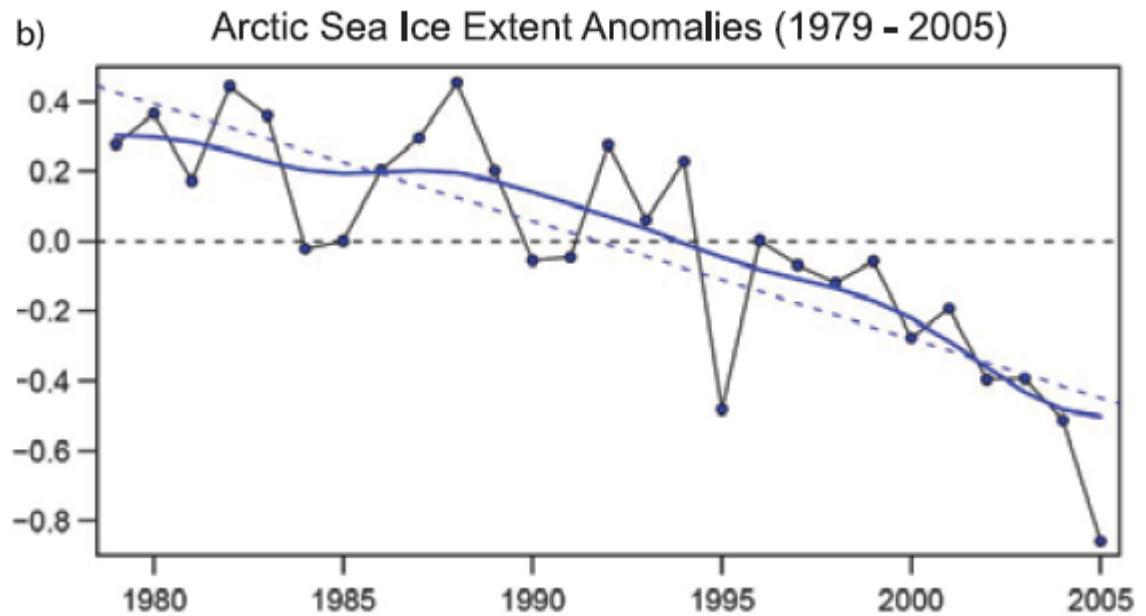
Liniowa zależność lodu morskiego i...



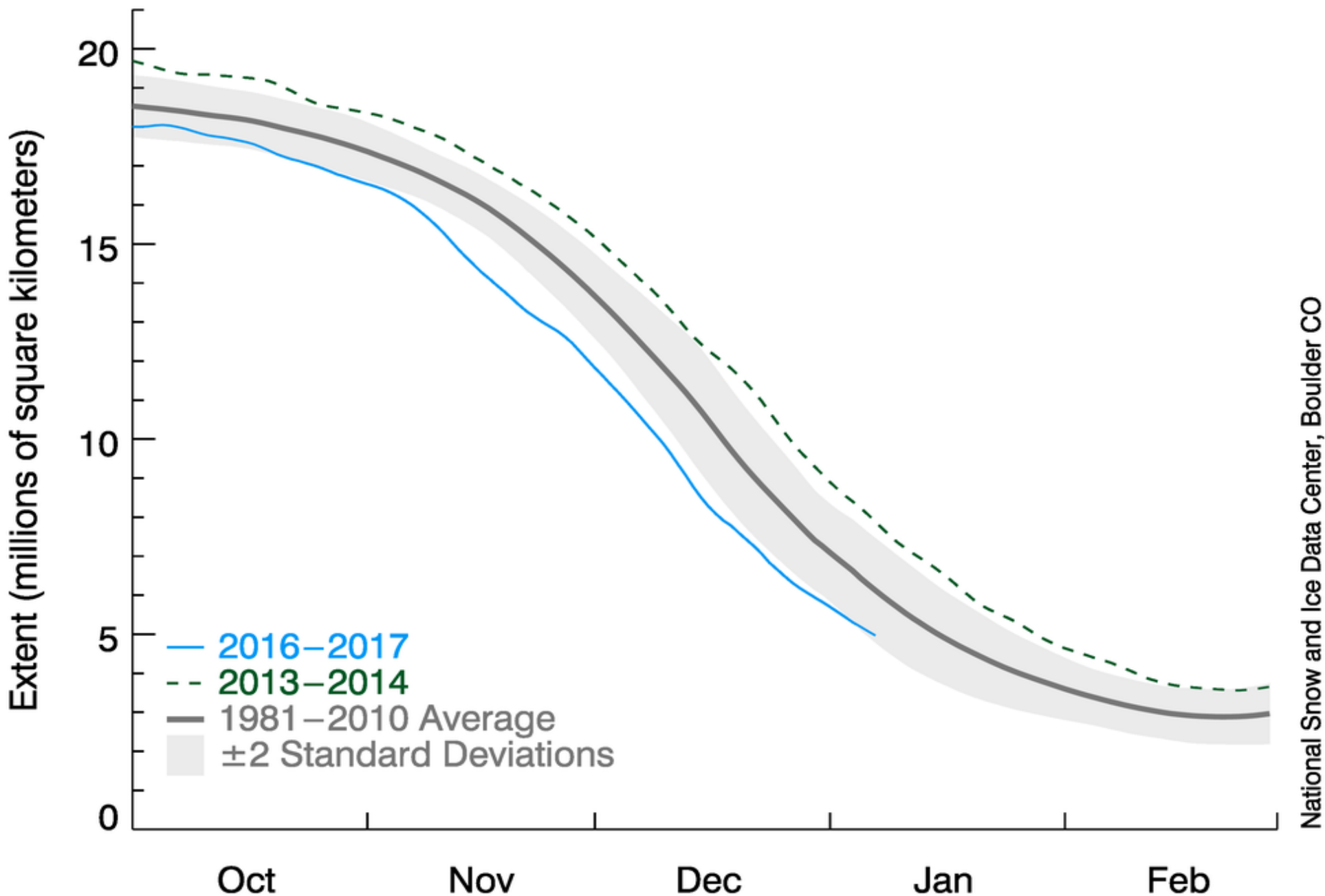
Obserwacje (niebieskie) i wyniki modelowania (czerwone), po prawej znormalizowane do obserwacji pokazują liniową zależność ubytku zasięgu lodu Arktycznego we wrześniu od... całkowitej masy wyemitowanego CO₂. Na tonę wyemitowanego CO₂ przypadają 3 ± 0.3 m² mniej lodu w Arktyce.

A co z asymetrią zmian zalodzenia?

W najnowszym raporcie IPCC asymetria nadal jest widoczna, chociaż pogorszyła się w... historycznych danych z lat 1980-ch.

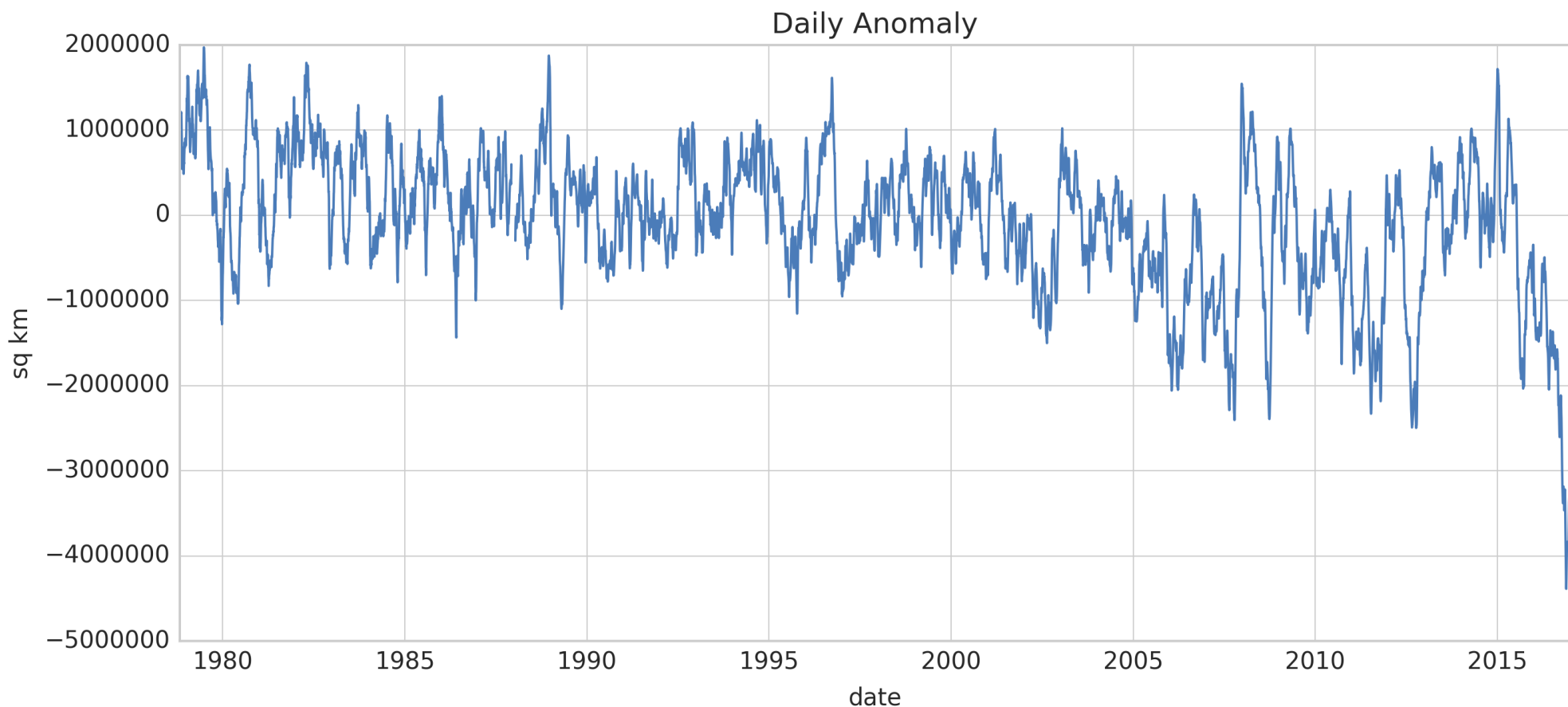


Antarctic Sea Ice Extent (Area of ocean with at least 15% sea ice)



National Snow and Ice Data Center, Boulder CO

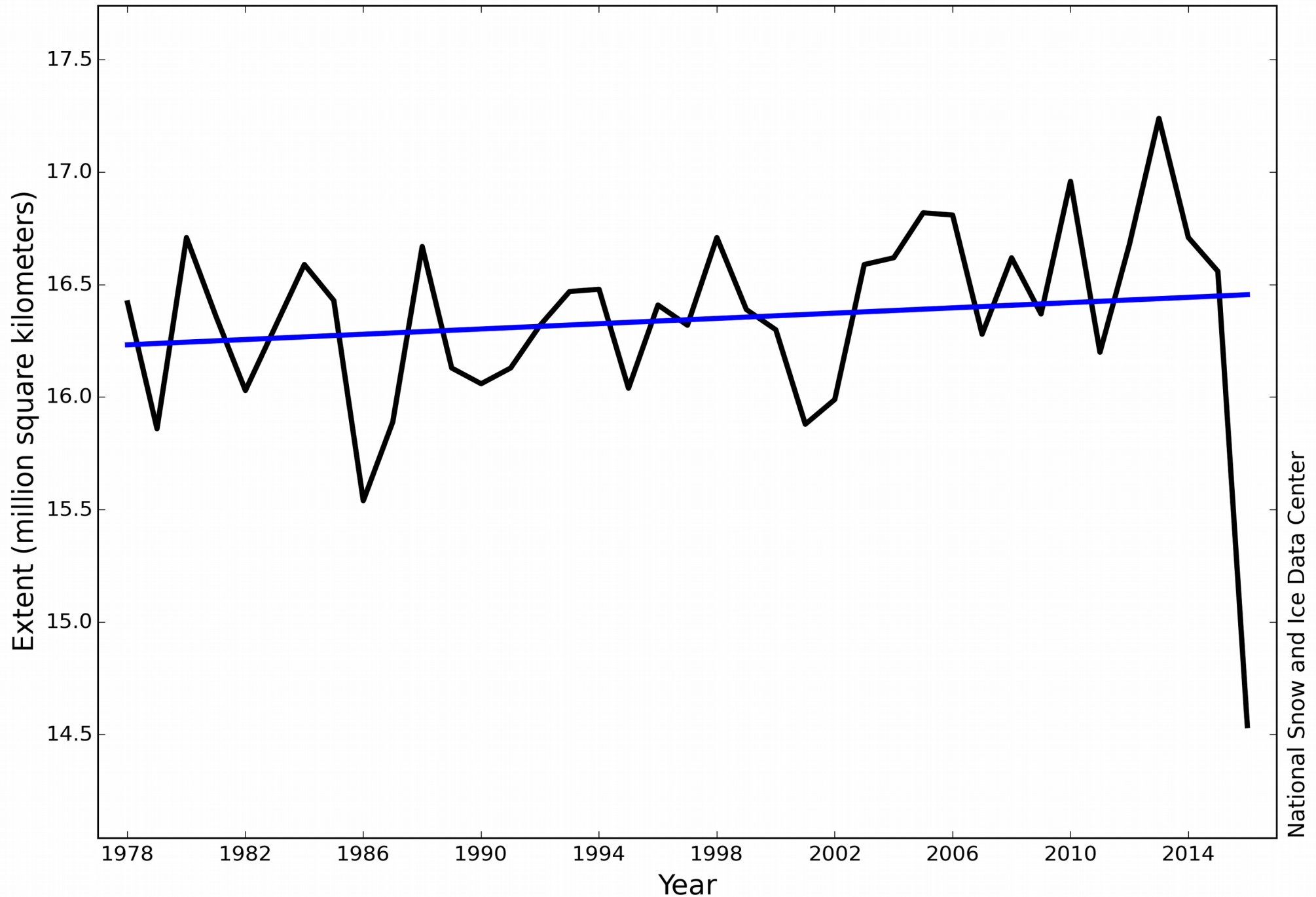
Czyżby się zaczęło i na południu?



Summaryczny zasięg lodu morskiego wokół obu biegunów (nie najlepsza miara ze względu na różną fizykę obu akwenów) na w ostatnich miesiącach najniższą wartość w okresie satelitarnym. Przyczyną jest nagłe odwrócenie trendu na Oceanie Południowym. Efekt spadania indeksu AMO, opóźniony efekt globalnego ocieplenia czy przypadek?

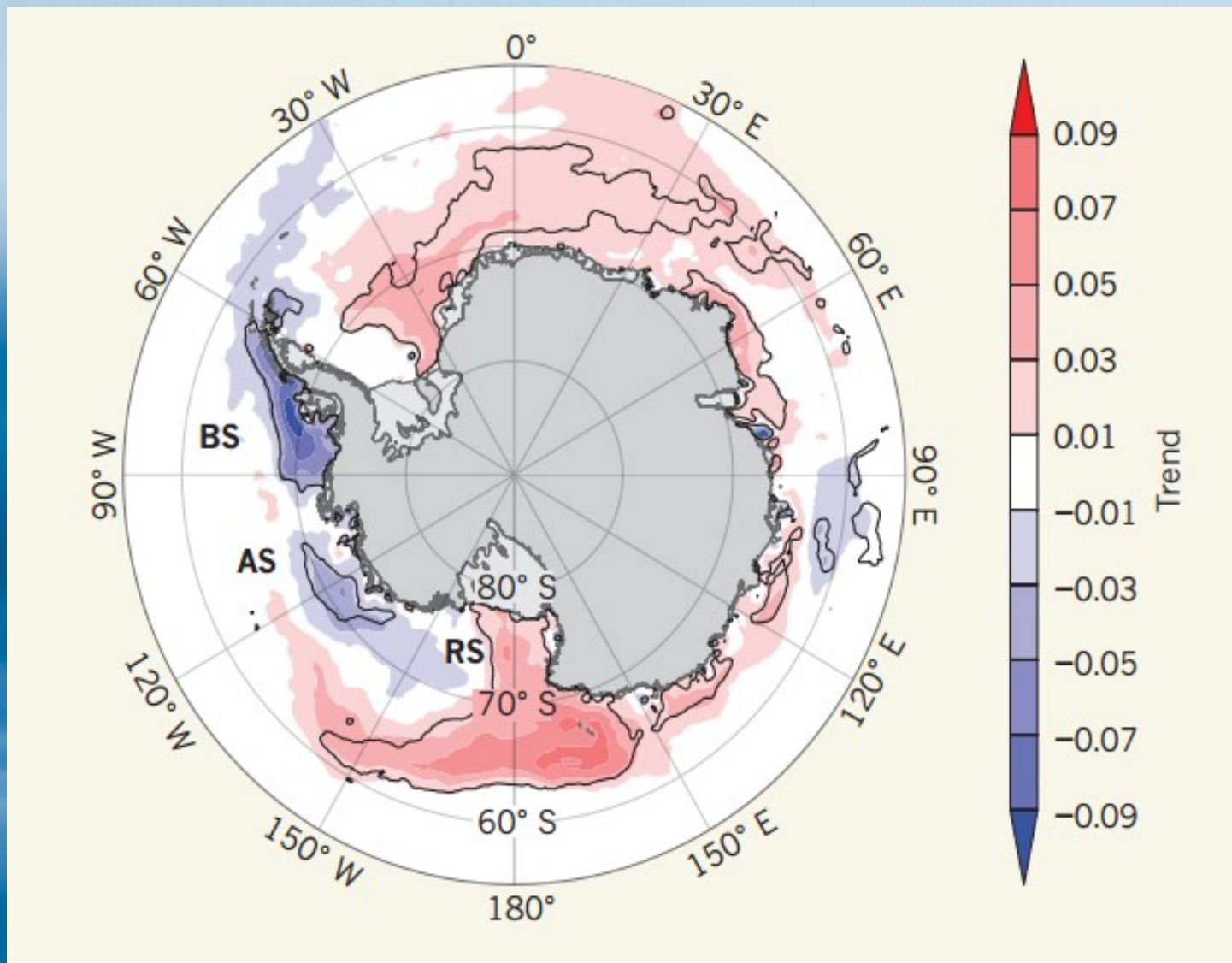
http://nsidc.org/data/seaice_index/images/daily_images/S_timeseries.png

Average Monthly Antarctic Sea Ice Extent November 1978 - 2016

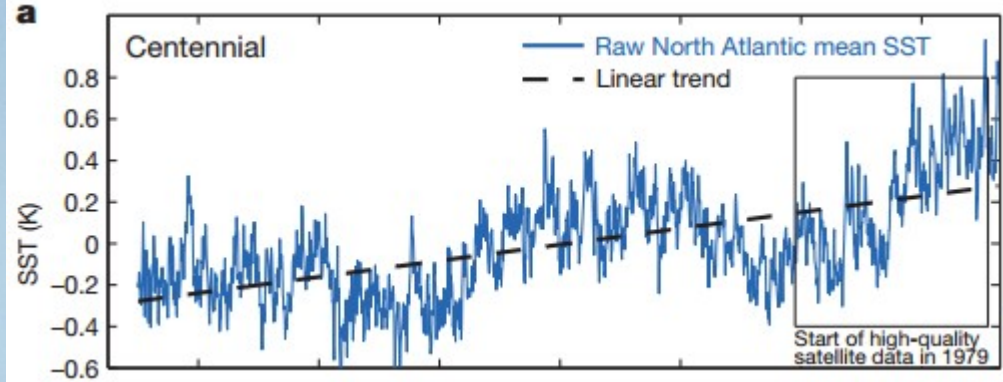


http://nsidc.org/arcticseaicenews/files/1999/12/monthly_ice_11_SH.png

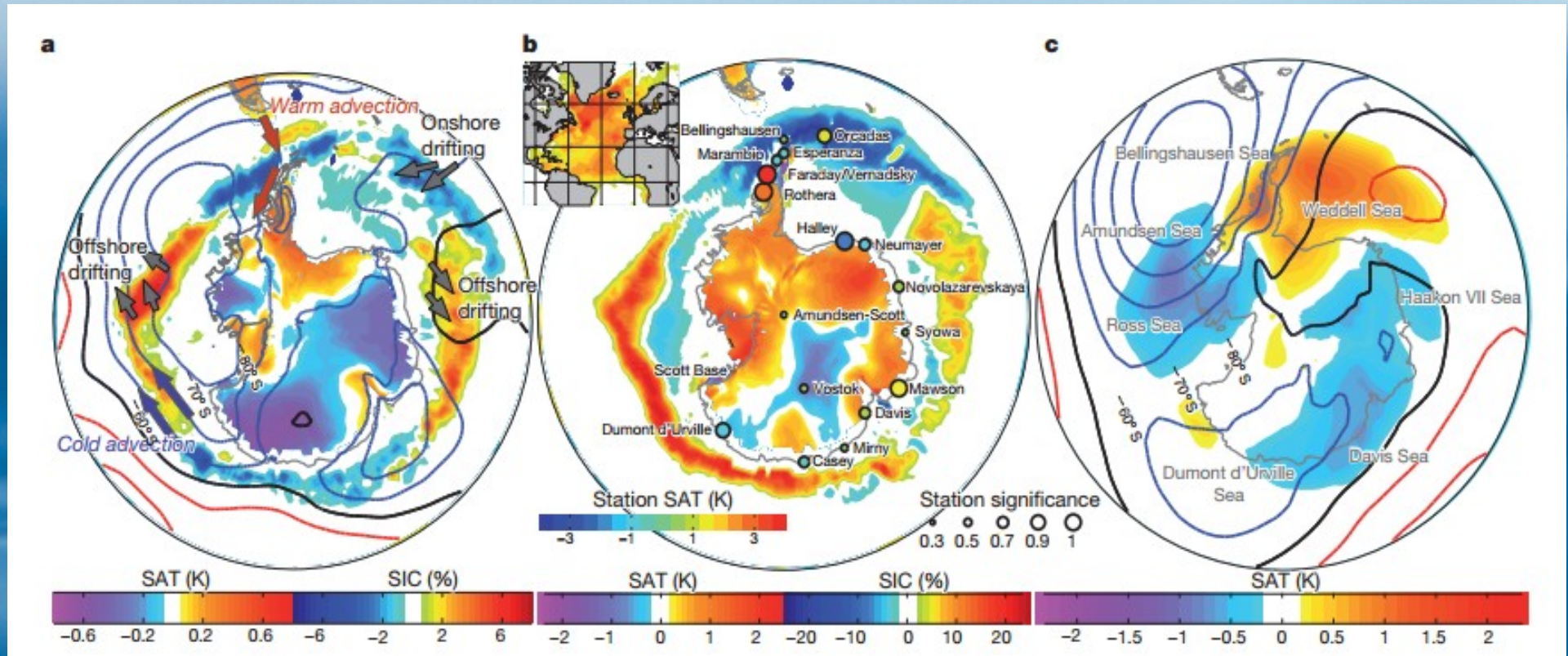
Trendy zalodzenia wokół Antarktydy



Trendy zmiany części powierzchni ("fraction") pokrytej lodem na dekadę w okresie 1979 – 2012. Gruba linia otacza obszary z trendem istotnym statystycznie.



Atlantyk odpowiada za trendy zalodzenia wokół Antarktydy?

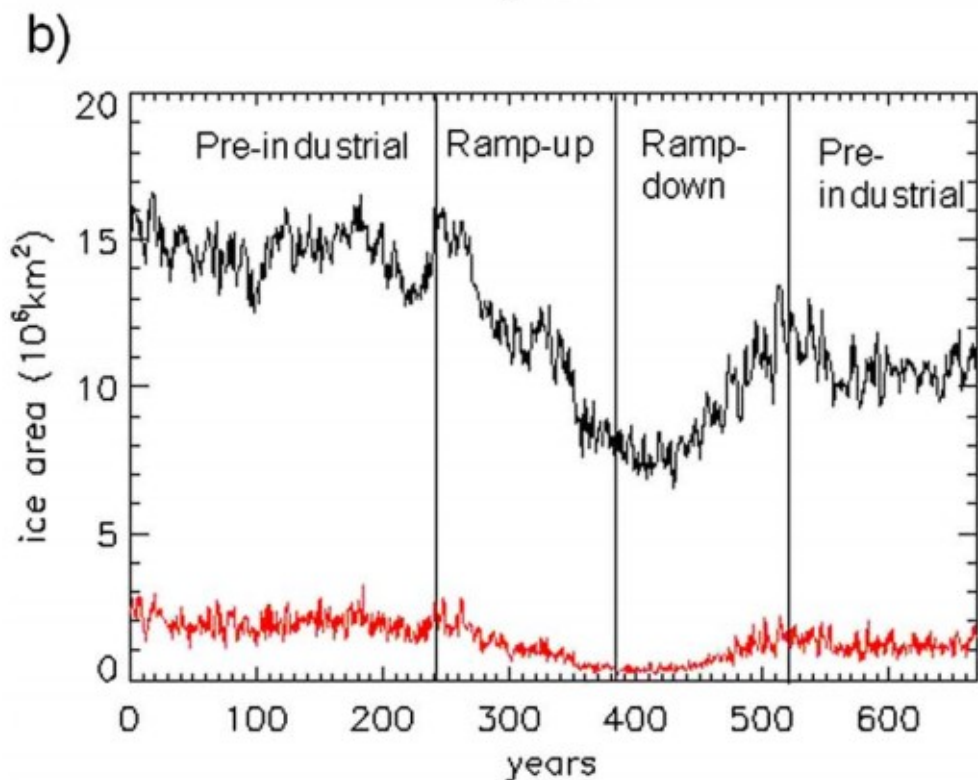
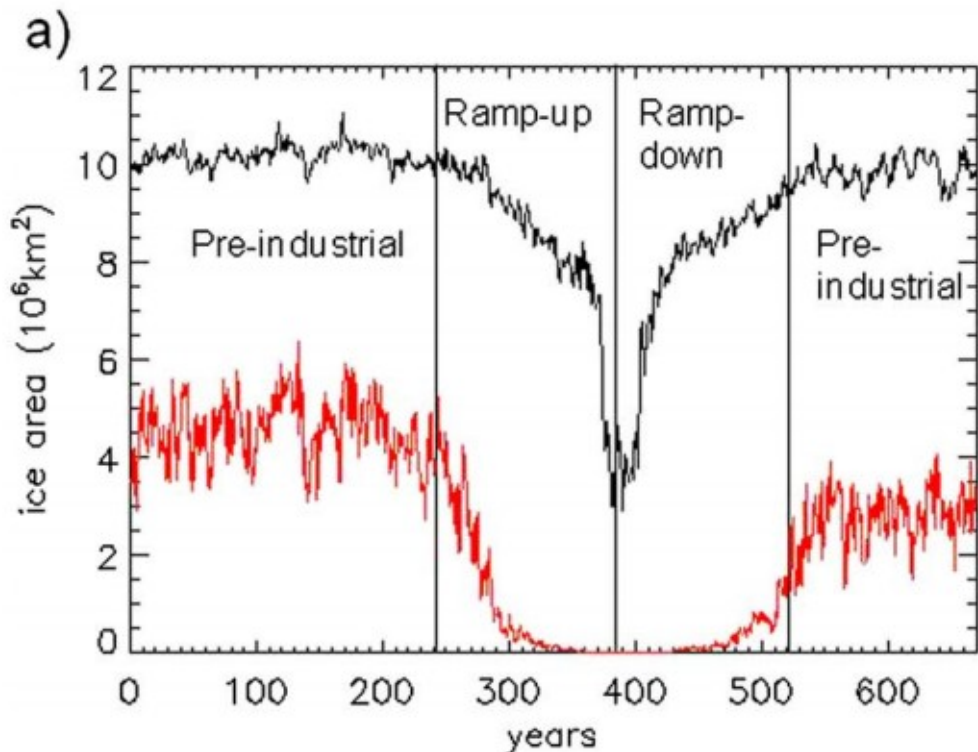


Temperatury Pn. Atlantyku z zaznaczonym okresem “satelitarnym” (na górze) oraz (a) Regresja atmosferyczne temperatury powierzchniowe (SAT), ciśnienia (kontury) i koncentracja lodu morskiego (SIC – uwaga na „odwróconą” skalę) z AMO, (b) różnica wartości dla wysokich (1996-2012) i niskich (1979-1995) wartości AMO, (c) wyniki modelowania.

Li et al 2014 (Nature)

Lód morski wokół Antarktydy: później ale nieodwracalnie

W eksperymencie modelowym, w którym zwiększamy koncentrację CO₂ do 1140 ppm a następnie zmniejszamy do wartości przedprzemysłowych (obie zmiany o 1% rocznie) zasięg lodu wokół Antarktydy (na dole) latem (czerwony) i zimą (czarny) spóźnia się o kilkadziesiąt lat w stosunku do Arktyki (na górze), natomiast nie wraca do tych samych wartości po “usunięciu” antropogenicznego CO₂ przez kilkaset lat. Powodem jest ogrzanie wód głębinowych wokół Antarktydy.



Podsumowanie 3/3

- Od 1993 widoczne jest napełnianie się wnętrza Oceanu Arktycznego ciepłą wodą Atlantycką. Jednocześnie Północny Atlantyk staje się coraz słodszy.
- Coraz bardziej dodatni indeks NAO/AO powodował zmiany cyrkulacji atmosfery a stąd i lodu w Arktyce, między innymi zwiększony wypływ lodu przez Cieśninę Fram.
- Korelacja z wpływem ciepłej wody złamała się ostatnio latach: nadal wpływa jej coraz więcej mimo spadku wartości AO.
- Powierzchniowe wody Arktyki są słodkie i zimne, zasilane rzekami Syberii i corocznym roztopianiem lodu morskiego. Jednak i w tej warstwie silny jest dopływ ciepła z Atlantyku i Pacyfiku.
- Pokrycie lodem morskim Oceanu Arktycznego maleje nawet szybciej niż przewidują modele, które wskazują na brak lodu latem po 2050 roku.



Okrety podwodne były do niedawna jednym z nielicznych sposobów zdobywania wiedzy o grubości arktycznego lodu



Dziękuję za uwagę

Zapraszam na egzamin.

Daty i godzizny do uzgodnienia

<http://www.iopan.gda.pl/~piskozub/klimat/>